

Eero Forsblom

Ajoneuvomallin kehittäminen simulaattoriin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

10.5.2017

Tekijä(t) Otsikko	Eero Forsblom Ajoneuvomallin kehittäminen simulaattoriin
Sivumäärä Aika	39 sivua + 3 liitettä 10.5.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Autosähkötekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Vesa Linja-aho Tuotepäällikkö Jukka Leskinen
<p>Opinnäytetyössä mallinnettiin ajoneuvo virkistys- ja harjoittelukäyttöön Foracer-ajosimulaattoriin. Ajosimulaattoria voidaan käyttää myös opetukseen ja mallinnettu etuvetoinen rallicross-sarjan ajoneuvo on hyvä työkalu auton käsittelyn harjoitteluun.</p> <p>Työn laajuus oli huomattava ja sen kehitystyö jatkuu vielä paljon julkaisun jälkeen. Auton mallintamisen apuna käytettiin useita erilaisia mallinnus- ja telemetriaohjelmistoja, joiden käytön oppiminen on välttämätöntä vastaavaa projektia suunniteltaessa. Suurin ongelma mallin kehittämisessä olivat simulaatio-ohjelmiston puutteet ajoneuvon akselistokinematiikan mallintamisessa, jolloin jouduttiin kokeilemaan monia erilaisia lähestymistapoja käytännön toteutuksessa.</p> <p>Mallinnettua ajoneuvoa tullaan käyttämään lähinnä asiakastilaisuuksissa; käytettävissä olevaan kalustoon saatiin helpommin lähestyttävä vaihtoehto asiakkaille. Mallinnetulla ajoneuvolla pitää ajaa useita testejä ja saada palautetta sarjan kuljettajilta. Renkaiden viimeistelyyn pyydetään tukea simulaattorin kehittäjältä.</p>	
Avainsanat	Simulaattori, ajosimulaattori, mallinnus, akselistokinematiikka

Author(s) Title	Eero Forsblom Vehicle Model Implementation for a Simulator
Number of Pages Date	39 pages + 3 appendices 10 th of May 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Electronics Engineering
Instructor(s)	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer Jukka Leskinen, Product Manager
<p>This thesis describes the creation of a vehicle model for recreational and exercise uses for a Foracer professional driving simulator. The simulator can also be used for teaching and the front-wheel drive rallycross car that was simulated is also a useful tool for learning car control.</p> <p>The scope of the work required in this thesis was substantial and development will continue after publication of this thesis. Several different modeling and telemetry software were used when creating the model and learning to use them is necessary when planning a similar project. The most challenging problem when creating the model, was a limit in the software used for simulating the vehicle's suspension kinematics and several different approaches had to be tested in practice.</p> <p>The simulated vehicle model will be mainly used at customer events. The vehicle presents an easy to approach alternative for other vehicles currently used in the simulator. The model still needs testing and feedback from rallycross drivers. The developer of the simulator software has been asked for support in developing a proper tyre model for the vehicle.</p>	
Keywords	Vehicle simulation, suspension dynamics, simulators

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tausta	1
1.2	Simulaattorit	1
1.3	Tavoitteet	2
1.4	Työn kuvaus	2
2	Lähtötilanne	4
2.1	Foracer- auton konvertointi Automobilistaan	5
2.2	Hakemistorakenne	5
2.3	Suorituskyvyn arviointi	6
3	Käytettävät ohjelmistot	9
3.1	Simulaattorit	9
3.2	Telemetry	9
3.3	Ajodynamiikka, akselistokinematiikka	10
3.3.1	Lotus Shark	10
3.3.2	Onshape	11
4	Mallinnettava auto	12
4.1	Massat ja hitausmomentti	12
4.2	Aerodynamiikka	15
4.3	Ilmavirtauksen aiheuttamat nostovoimat	17
4.4	Iskunvaimentimet ja jousitus	18
4.5	Kallistuksenvakaajat	21
4.6	Pyörien suuntaus ja säätövarat	22
4.6.1	Renkaan kääntöakselin sivu- ja takakallistuma	23
4.6.2	Camber-kulma	25
4.6.3	Auraus ja haritus	26
4.7	Voimansiirto	27
4.8	Jousituksen geometriat	28
4.9	Moottori	34

4.10 Renkaat	35
5 Toteutus	36
6 Yhteenveto	37
Lähteet	39
Liitteet	
Liite 1. Jousituksen määrittäminen	
Liite 2. HDV-tiedosto	
Liite 3. Kyselylomake	

Lyhenteet

ISI	Image Space Corporated, ohjelmistoyritys
GPS	Global Positioning System, maailmanlaajuinen paikantamisjärjestelmä
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
SAE	Society of Automotive Engineers International
SAI	Steering Axle Inclination, renkaan kääntöakselin sivukallistuma
KPI	Kingpin Inclination, renkaan kääntöakselin sivukallistuma
CUP	Renault Clio CUP IV -kilpa-ajoneuvo

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoitteena on mallintaa ajoneuvon ajodynamiikka rFactor- ja Automobilista-ajosimulaattoreihin yhteistyössä Foracer- ja X-R'cer-yritysten kanssa. Työssä tullaan selvittämään vaadittavat mittaukset ja laskut ajoneuvon ajokäyttäytymisen jäljentämiseen simulaattorin avulla sekä tehdään malli, joka soveltuu ajoharjoitteluun ja elämystoimintaan.

1.1 Tausta

Ajosimulaattoreiden käyttö moottoriurheilussa on kasvanut huomattavasti viimeisen kymmenen vuoden aikana ja kiinnostus ajosimulaattoreita kohtaan on lisääntynyt myös moottoriurheiluharrastajien ja pienempien tallien joukossa [1]. rFpro-simulaattori on käytössä esimerkiksi monilla Formula 1 -sarjan talleilla, mukaan lukien Red Bull Racing [2].

Syksyllä 2016 Jukka Leskinen Foracerilta esitti toiveen yritykselle räätälöidyn rallicross-auton päivittämisestä uudempaan simulaattoriin. Foracerilla käytössä oleva auto on tehty ulkomaisen harrastelijaryhmän voimin Image Space Corporated (ISI) -yrityksen kehittämään rFactor-simulaattoriin ja se päivitettiin uudempaan ISI-lähdekoodiin perustuvaan simulaattoriin.

1.2 Simulaattorit

Simulaattori on tietokoneen ja ohjelmiston yhdistelmä, jolla jäljitellään aidon järjestelmän toimintaa ja jolla voidaan harjoitella joko yksittäisen asian tai kokonaisuuden oppimista. Se muistuttaa jäljittelemäänsä laitetta tai toimintoa vaihtelevasti. Se saattaa olla lähes täydellinen jäljitelmä tai jäljitellä sitä vain osin. [3, s. 96.]

Tässä työssä käytettävillä ohjelmilla simuloidaan auton ajamista moottoriradalla ja niitä käytetään yhä useammin kuljettajien koulutuksessa apuvälineinä auton hallinnan perusasioiden ja telemetrian lukemisen oppimisessa. Simulaattorin avulla voidaan käydä ennalta läpi myös monia kilpailun aikana sattuvia tilanteita, joista kuljettajalle ei kerry

kokemusta muuten kuin kilpailemalla. Siviili liikenteen puolella hyvä esimerkki havainnointiharjoituksista on pimeänajon simulaattorit.

Simulaattoreita tulisi mielestäni käyttää apuvälineenä muun muassa rataleimatutkintoa suorittaessa. Tällä hetkellä rataleimatutkinto on kaksiosainen, ja siihen kuuluu teoriaosa sekä erillinen ajoharjoittelu ja ajokoe. Uudelle harrastajalle varsinainen kilpailukokemus tulee vasta oman luokan kilpailuihin osallistuttaessa ja simulaattoriharjoittelu ennen varsinaista ajosuoritusta on suositeltavaa. Simulaattorin käyttäminen opetuksessa mahdollistaisi usean kilpailulähdön harjoittelun ilman mainittavia lisäkustannuksia.

1.3 Tavoitteet

Tavoitteena on selvittää vaadittavat parametrit ja mittaukset ajoneuvon mallintamiseksi ISI-lähdekoodiin pohjautuvalla simulaattorilla ja verrata sen suorituskkyä ja käyttäytymistä perustuen oikean ajoneuvon telemetriotietoihin ja kuljettajien henkilökohtaiseen kokemukseen. Testikuljettajilla on parhaimmillaan vuosikymmenten kokemus erilaisten ralli-cross-autojen ajamisesta ja vuosien kokemus simulaattoreilla ajamisesta, joten heidän palautettaan pidetään merkittävänä lopputulosta arvioitaessa. Tärkeimpänä tavoitteena pidän auton käyttäytymisen tunnistettavimpien ominaisuuksien mallintamista riittävällä tarkkuudella. Ajosimulaattoria ei tässä tapauksessa käytetä auton kehitystyössä. Tärkein tavoite on kehittää kuljettajaa ja tarjota mahdollisimman tarkka kuvaus siitä, miten ajoneuvoa ajetaan erilaisilla radoilla ja erilaisilla profiileilla.

1.4 Työn kuvaus

Työt aloitettiin kääntämällä yrityksen käytössä ollut ajoneuvo uuteen simulaattoriin ja selvitettiin, onko mahdollista mallintaa kokonaan uusi ajoneuvo käytettäväksi simulaattorissa. Olemassa olevan ajoneuvon konvertointi osoittautui yksinkertaiseksi toimenpiteeksi, mutta ajoneuvon tiedostorakennetta piti selkeyttää ja mikäli haluaa käyttää kaikkia uuden simulaattorin tuomia ominaisuuksia, pitää auton määrittäviin tiedostoihin lisätä parametreja. Myös valikkografiikat ja sarjamääritykset uudistettiin auton käytön helpottamiseksi.

Suurin ongelma vanhan auton käyttöönotossa oli auton grafiikkatiedostojen verifiointi, tämä ongelma kierrettiin käyttämällä testivaiheessa toista vastaavan ajoneuvon mallia. Yrityksen oma 3D-mallintaja laatii myöhemmin ajoneuvoon uudet yhteensopivat tekstuurit ja 3D-mallin.

Kun ajoneuvon päivitys todettiin onnistuneeksi, aloitettiin selvitystyöt uuden ajoneuvon mallinnusta varten. Alun perin tarkoituksena oli mallintaa SRC-luokan ajoneuvo, mutta neuvottelut tallien kanssa eivät onnistuneet. Yhteistyökumppaniksi saatiin lopulta RX Academy ja lupa mallintaa tulevaan rallicross -sarjaan rakennettu Renault Clio.

Ajoneuvosta kerättiin ensin kaikki mahdolliset tekniset tiedot ja auton maahantuoja antoi mahdollisuuden käydä suorittamassa mittauksia paikan päällä. 3D-mallia autoon ei ollut ja alun perin tarkoitus oli joko ostaa valmis malli tai teettää auton grafiikat ulkopuolisella toimijalla. Sattumalta simulaattoriin julkaistiin alkuvuodesta 2017 samasta korimallista tehty rata-auto ja sen tekijät antoivat luvan käyttää grafiikoita ja ääniä omasta työstään.

Teknisten tietojen keräyksen jälkeen aloitettiin auton mallintaminen vaihe vaiheelta, pohjana käytettiin olemassa olevaa ajoneuvoa ja muutokset aloitettiin hitausmomenteista ja auton massoista. Samalla tarkistettiin 3D-mallin ulkomittojen mittasuhteet. Autoa testattiin päivittäin ja seurattiin kehityksen suuntaa sekä ajokäyttäytymisessä, että kierrosajoissa. Aluksi autoa testattiin CUP-auton säädöillä ja jousituksen geometriat tehtiin uusiksi valmistajalta saatujen tietojen pohjalta. Auto osoittautui huomattavan paljon nopeammaksi kuin oletettiin ja kun renkaita verrattiin muihin simulaattorissa käytettäviin ajoneuvoihin, huomattiin rengaspidon olevan huomattavan suuri. Kun kierrosajat muutetulla renkaalla olivat lähempänä arvioitua, aloitettiin jousituksen mallintaminen rallicross auton säätöjen mukaan. Auton jouset ja iskunvaimentimet tehtiin uusiksi ja joustomatkat muutettiin uuden alustan säätöjen mukaisiksi.

Ennen auton esittelyä Foracerin toimipisteessä tehtiin autoon vielä valikkografiikat (kuva 1) ja maalaukset (kuva 2) Academy RX:n tyyliä mukaillen.



Kuva 1. Valikkografiikat.



Kuva 2. Ajoneuvo simulaattorissa.

Auton kehitystyötä jatketaan vielä käyttöönoton jälkeen ja ensimmäiset vertailukelpoiset telemetriatiedot mallinnettavasta ajoneuvosta saadaan toukokuussa 2017.

2 Lähtötilanne

Foracerilla on simulaattorikäytössä ajoneuvo, joka piti päivittää rFactor-simulaattorista uudempaan ohjelmistoon.

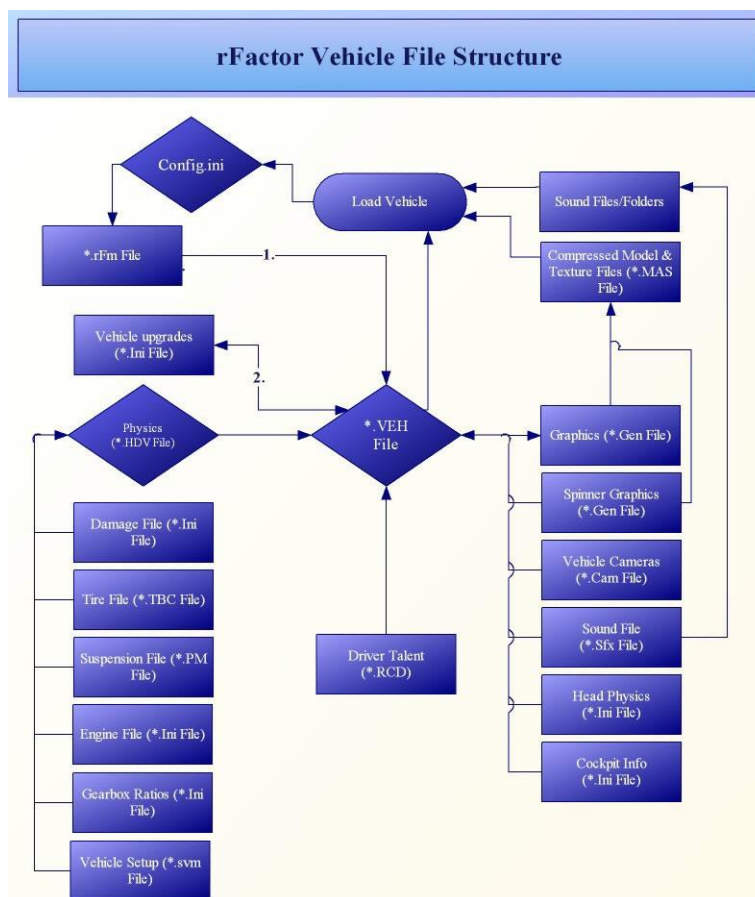
Tässä luvussa käydään lyhyesti läpi vaadittavat muutokset olemassa olevaan autoon ja sen hakemistorakenteeseen. Lopuksi verrataan päivitetyn auton suorituskykyä vanhaan malliin. Käytössä olleen ajoneuvon tiedostorakenne selvitettiin ja karsittiin kaikki

ylimääräinen sisältö pois. Vanha malli siirrettiin suoraan uuteen simulaattoriin ja tehtiin tarvittavat muutokset auton määrittäviin tiedostoihin.

2.1 Foracer- auton konvertointi Automobilistaan

Foracerin olemassa oleva simulaattoriajoneuvo konvertoitiin uudempaan ohjelmistoon lähes suoraan. Hakemistorakenne siistittiin ja muutettiin alla esitettyyn muotoon (kuva 3). Kokeilukäyttöä varten auton grafiikat otettiin toisesta ajoneuvosta ja auton koria piti nostaa hieman graafisten virheiden välttämiseksi. Tämän seurauksena myös auton jousituksen referenssipisteitä piti muuttaa vastaavasti.

2.2 Hakemistorakenne



Kuva 3. Hakemistorakenne [4].

Päätiedostona voidaan pitää *.rfm- ja *.srs-tiedostoja jotka määrittävät yleiset asetukset ja ajoneuvon hakemistopolun pelille. Ne löytyvät rFactor\rFM ja Automobilista\srs hakemistoista.

Ajoneuvon käyttämät tiedostot määritellään *.veh-tiedostolla joka voidaan luoda erikseen esimerkiksi yksittäisen sarjan jokaiselle autolle. Auton grafiikat määritellään *.gen-tiedostoissa. *.sfx-tiedosto määrittää auton käyttämät äänet ja sisältää hakemistopolun määrittäykset käytettävälle äänitiedostolle. Tärkeimmät tiedostot ajoneuvon fysiikan mallintamiseen ovat *.hdv, *.pm, engine.ini ja *.tbc. *.Hdv sisältää kaikki auton fyysiset ominaisuudet ja voimansiirron määrittävät parametrit, *.pm-tiedosto sisältää auton alustageometrian ja engine.ini tiedostoon määritellään moottorin vääntömomentti ja inertiat. *.tbc-tiedostoon määritellään renkaan parametrit.

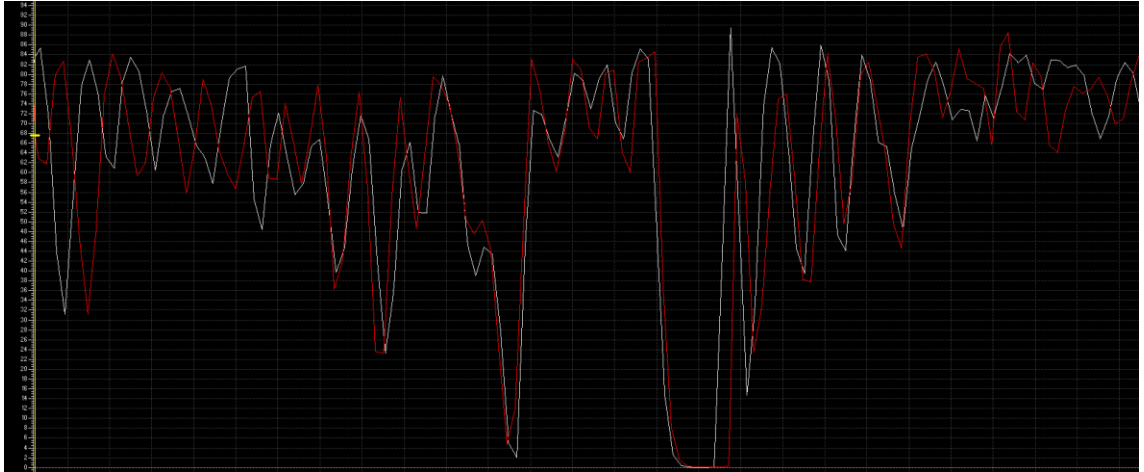
Uutta autoa tehdessä on tärkeää tehdä hakemistorakenteesta mahdollisimman selkeä ja keskittää kaikki *.VEH-tiedostossa määritellyt tiedostot samaan paikkaan. Esimerkkiauton tiedostot ovat kolmen polun takana:

- GameData\Vehicles\Foracer\Citroen_DS3\
- GameData\Sounds\Foracer\
- Gamedata\SRS\.

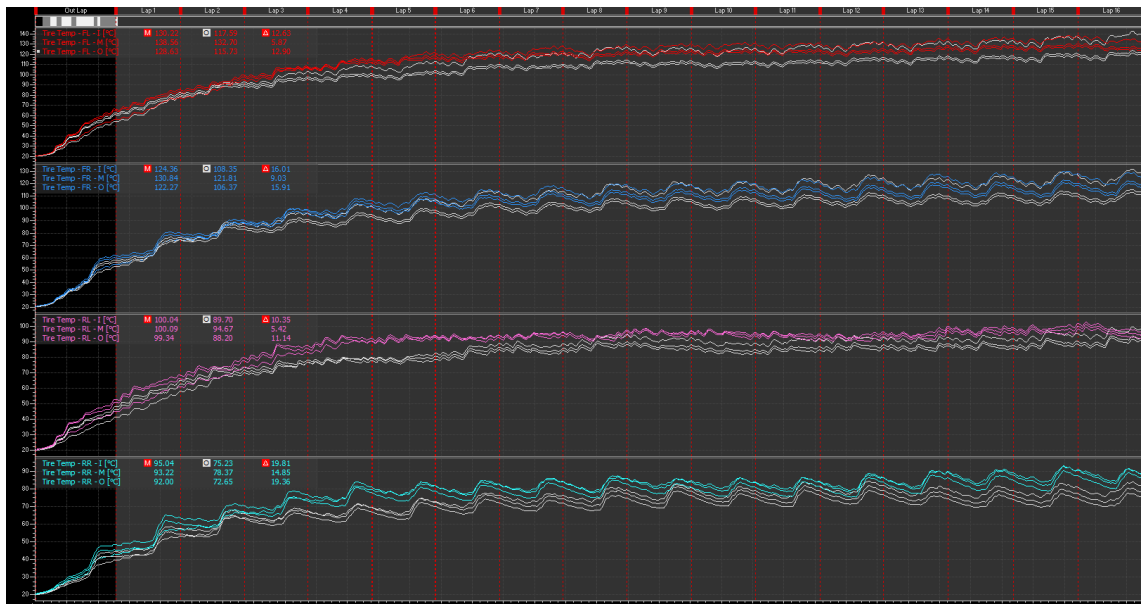
2.3 Suorituskyvyn arviointi

Koska ohjelmissa on pieniä eroja ja autoon täytyi tehdä muutoksia, varmistettiin konversion onnistuminen ajamalla molemmilla autoilla 15 kierrosta Kouvolan radalla simulaattorissa ja vertailemalla telemetriatietoja. 15 kierrosta on riittävän suuri otanta virheiden huomaamiseen, mikäli kuljettajan suoritustaso pysyy tasaisena.

Jousituksen käyttäytymistä verrattiin telemetriatietojen pohjalta (kuva 4). Kuvista nähdään jousituksen toimivan samalla tavalla myös uudemmassa simulaattorissa. Rengasmallissa näyttäisi olevan eroa renkaan lämpenemisen suhteen: uudemmalla simulaattorilla renkaat eivät lämmenneet yhtä paljon (kuva 5). Tämä voi johtua myös ympäristön tai tien lämpötilasta ja vaatii hieman lisäselvitystä.



Kuva 4. Vasemman etujousituksen korkeus takasuoralla. Uuden ohjelmiston tulokset valkoisella.



Kuva 5. Rengaslämpöjen kehitys.

Telemetriasta nähtiin, että auton mallinnus oli vastaava, mutta ohjaustuntuma oli testaajien mielestä erilainen. Uudemmassa simulaattorissa ohjausvaste oli parempi, mutta rattiin välittyvät voimat heikkoja. Erot ohjaustuntumassa johtuvat uudemman simulaattorin tavasta mallintaa suoraan ohjausakselille välittyviä voimia, vanhassa mallissa ohjausgeometrian rakenne ei aiheuttanut voimien puuttumista vaan keskittävät voimat luotiin keinotekoisesti. Ratille välittyvien voimien vahvuutta lisättiin, mutta paremman tuntuman saamiseksi täytyy ajoneuvon Force Feedback -asetuksia muuttaa

tai muuttaa sen ohjausgeometriaa. Koska tarkoituksena on mallintaa kokonaan uusi auto, päätettiin tarvittavat muutokset siirtää myöhempään ajankohtaan.

Kierrosaikoja verrattiin laskemalla 15 kierroksen kierrosajat ja oletettiin kierrosaikojen vaihtelun noudattavan normaalijakaumaa (kaava 1; taulukko 1). Virherajaksi Δx oletetaan keskiarvon standardipoikkeama.

$$\Delta \bar{x} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

Taulukko 1. Kierrosajat Kouvola.

Kierrosajat FORACER DS3 @Kouvola
Forsblom

AUTOMOBILISTA		RFACTOR	
	Totals		Totals
1	41.523	1	41.421
2	41.356	2	40.784
3	41.124	3	40.79
4	41.026	4	41.274
5	40.616	5	40.661
6	40.871	6	40.854
7	40.875	7	40.794
8	40.749	8	41.092
9	41.079	9	41.223
10	41.33	10	41.409
11	40.768	11	41.142
12	41.346	12	40.871
13	41.574	13	41.434
14	41.105	14	41.772
15	41.205	15	41.517
	41.10313		41.13587
Keskihajonta	0.289174	Keskihajonta	0.333676
Varianssi	0.083621	Varianssi	0.11134
Keskiarvon keskivirhe	0.074664	Keskiarvon keskivirhe	0.086155

Vanhalla ohjelmalla kierrosaikojen keskiarvoksi saatiin $41,10 \pm 0,08$ s ja uudella versiolla $41,14 \pm 0,09$ s, ajokorkeuden delta oli keskimäärin 3,8 mm ja telemetriasta nähtiin jousituksen toimivan odotetusti. Rengaslämmöissä nähtiin suurin ero, joka oli n.

10 °C matalampi uudella versiolla. Renkaihin kohdistuvat voimat olivat käytännössä identtiset, kuten oletettiin.

3 Käytettävät ohjelmistot

3.1 Simulaattorit

Simulaattorina on ISI-lähdekoodiin pohjautuva vielä kehityksessä oleva simulaattori. Osa tämän työn vaiheista on tehty rFactor-simulaattorilla, joka on julkaistu jo vuonna 2005. Molemmat simulaattorit perustuvat isiMotor-pelimoottoriin, ja ne ovat rengasmallin ja aerodynamiikan osalta hieman uusimpia simulaattoreita jäljessä. Pelimoottorin kehittynein versio on käytössä rFactor 2 -simulaattorissa, mutta käyttäjäystävällisyyden ja osin henkilökohtaisten preferenssien takia päädyttiin toiseen pelimoottoriin. Lopullinen simulaatiomalli on mahdollista kääntää kohtuullisella työmäärällä myös uudempaan pelimoottoriin.

3.2 Telemetry

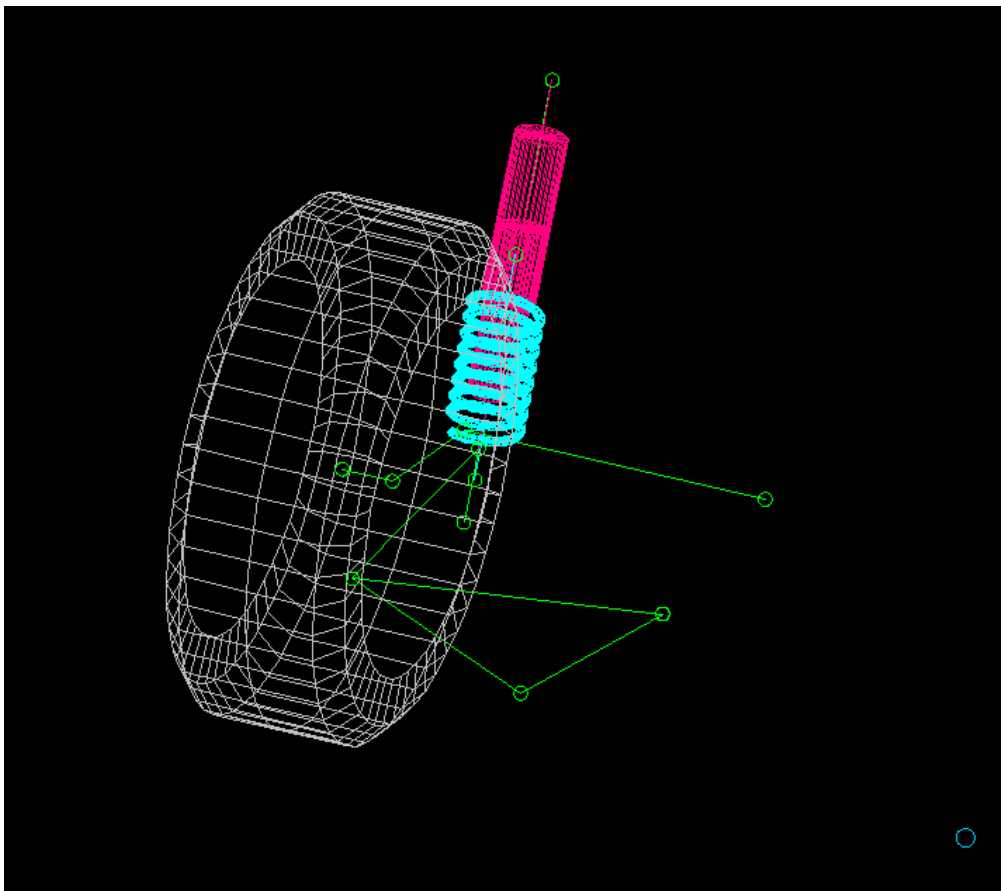
Telemetryohjelmistona käytetään Motec i2 Pro, versiota 1.01.0082, koska siihen on lisenssi, siitä on eniten kokemusta ja se saadaan helposti toimimaan kaikkien käytettävien ohjelmien kanssa. Ohjelmistolla verrataan autoista saatua dataa simulaattorilta sekä oikeasta autosta. Tarkasteltavia kohteita ovat kiihtyvyydet pitkittäis- ja sivusuunnissa, nopeus, kuljettu etäisyys, jousituksen liikkeet, polkimien asennot ja ratin kääntöasteet.

Mallinnettava auto on varustettu VIDEO VBOX LITE -tiedonkeruujärjestelmällä, josta saadaan tallennettua auton sijainti GPS-signaalin avulla, näytteenottotaajuus on 10 Hz. Ajolinjojen vertaaminen Kouvolaossa onnistuu vertaamalla auton sisälle sijoitetusta kamerasta kuvaa simulaattorista nauhoitettuun tallenteeseen. Ohjauspyörän kääntöasteita seurataan myös kamerasta, mikäli ajoneuvosta ei saada anturitietoa ohjauspyörän asentoanturilta.

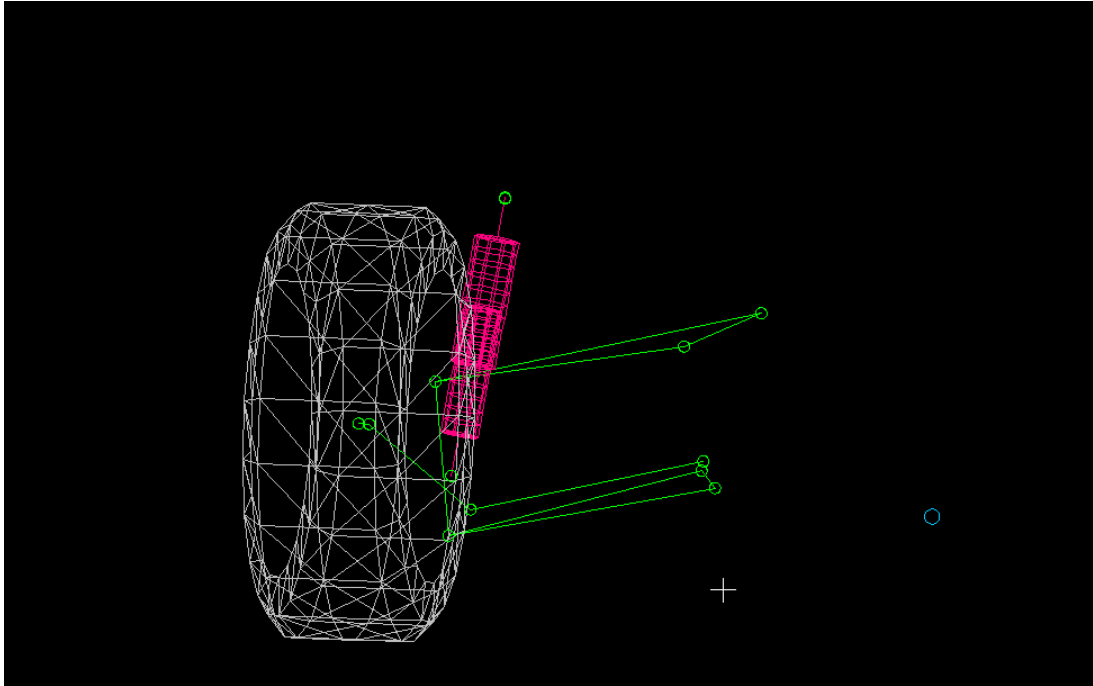
3.3 Ajodynamiikka, akselistokinematiikka

3.3.1 Lotus Shark

Jousitusgeometria mallinnetaan Lotus Shark ohjelmistossa ja mallinnuksen avulla tutkitaan vaihtoehtoisia tapoja simuloida ajoneuvon alustaratkaisuja simulaattorissa. Taka-akselin osalta vastaavaa rakennetta ei saatu toistettua täydellisesti, joten sen käytöstä simuloidaan muuttamalla ajoneuvon muita ominaisuuksia. Esimerkkikuvissa havainnoidaan ajoneuvon erilaisia jousitusratkaisuja ohjelmalla (kuva 6, kuva 7), ne eivät vastaa lopullista mallia.



Kuva 6. Lotus Shark, Etuakseli McPherson-tyyppisellä tuennalla.



Kuva 7. Lotus Shark, etuakseli kolmiotukivarsilla.

Ohjelmistossa on mahdollista mallintaa useita eri alustaratkaisuja joko itse määritetyillä liikeradoilla tai ulkopuolisilla voimilla, jolloin voidaan simuloida jousituksen toimintaa erilaisissa tilanteissa. Geometriaa suunniteltaessa keskityttiin aluksi tasajoustoon, korin kiertymään ja ohjauskulmien aiheuttamiin muutoksiin. Shark valittiin käytettäväksi ohjelmistoksi sen hyvän käytettävyyden takia. Kaikista simulaatioista voidaan piirtää käyrät ja tehdyt muutokset päivittyvät reaaliajassa.

Auton etuakseli tehdään suoraan kaksoiskolmiotukivarsilla, käyttäen valmistajalta saatuja arvoja eturenkaan kulmamuuksista joustossa. Taka-akseli mallinnetaan vastaavalla rakenteella Sharkissa ja pyritään rakentamaan mahdollisimman samanlainen rakenne kolmiotukivarsilla. Mikäli tässä ei onnistusta, yritetään takapään käytöstä korjata mahdollisesti muuttamalla joustoaurasta liioitellusti. Jos nämä muutokset aiheuttavat epätoivottua käytöstä jarrutuksissa tai joustotilanteissa, pyritään peräpään käyttäytymistä hallitsemaan muuttamalla suoraan rengaspitoa taka-akselilla.

3.3.2 Onshape

Onshape-ohjelmistoa käytetään ilmanvastuksen ja auton hitausmomenttien arvioimiseen. CAD-mallinnuksen edut ovat mallin visualisoimisessa, jolloin voidaan

arvioida ominaisuuksia jo silmämääräisesti. Aerodynamiikkaa voidaan arvioida mallintamalla auton kori ja siirtämällä valmis malli johonkin toiseen ohjelmaan, jolla simuloidaan virtausteknisiä ominaisuuksia. Sitä voidaan käyttää myös auton jousitusgeometrian mallintamiseen, mutta on huomattavasti nopeampaa käyttää siihen erikoistuneita ohjelmia.

4 Mallinnettava auto

Mallinnettavaksi autoksi valittiin 2017 aloittavan RX Academyn rallicross käyttöön rakennettava versio Renaultsport 4 Clio Cup -autosta. Autot ovat etuvetoisia, poikittain asennetulla 1,6 l:n turboahdetulla rivimootorilla ja suorakytkentävaihdelaatikolla varustettuja katuautoon perustuvia kilpa-autoja (kuva 8).



Kuva 8. Renault Clio Cup Spec. RX.

Auton mallintamiseen vaadittavat tekniset tiedot saatiin osin valmistajalta, osa mitataan ja muutamia tietoja joudutaan arvioimaan yleisen kokemuksen pohjalta. Joihinkin osaluokkiin jouduttiin kehittämään vaihtoehtoisia tapoja mallintaa ne.

4.1 Massat ja hitausmomentti

Auton tietojen lisääminen aloitetaan selvittämällä massat ja laskemalla autolle ja pelissä mallinnettaville liikkuville kappaleille hitausmomentin. Tässä tapauksessa laskemme

hitausmomentit tunnetuille komponenteille ja laskemme näistä koko systeemin hitausmomentin.

$$I_z = m \cdot \left(\frac{b^2 + c^2}{12} \right) \quad (2)$$

$$I_x = m \cdot \left(\frac{a^2 + b^2}{12} \right) \quad (3)$$

$$I_y = m \cdot \left(\frac{a^2 + c^2}{12} \right) \quad (4)$$

$I_{z,x,y}$ on hitausmomentti korkeus, leveys ja syvyys suunnassa

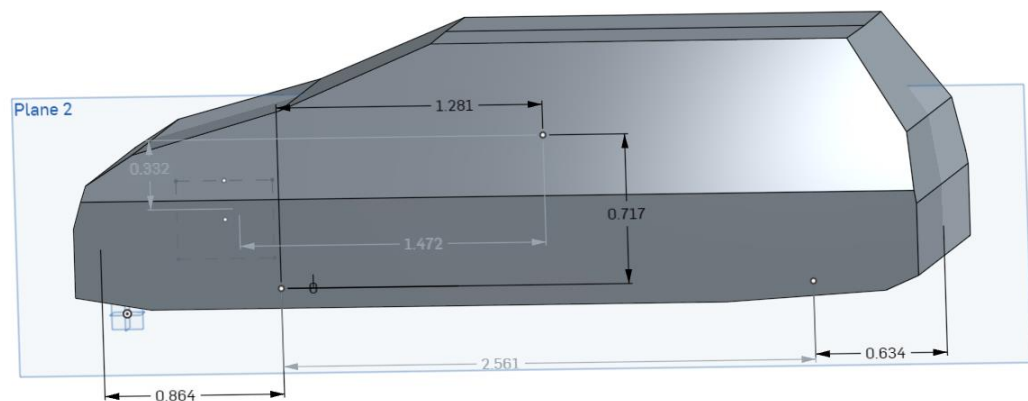
m on kappaleen massa

a on kappaleen korkeus

b on kappaleen leveys

c on kappaleen pituus

Komponenttien yksittäisten hitausmomenttien laskemisen jälkeen on ne vielä laskettava yhteen joka akselin suhteen käyttäen referenssinä koko kappaleen yhteistä massakeskipistettä. (kuva 9)



Kuva 9. Havaintokuva etäisyyksien arvioimisesta korin massakeskipisteeseen

$$J = I_{x,y,z} + md^2 \quad (5)$$

$I_{z,x,y}$ on hitausmomentti korkeus, leveys ja syvyyssuunnassa

m on kappaleen massa

d on etäisyys massakeskipisteestä

Lopullista tulosta verrataan vastaavan malliseen ja kokoiseen autoon josta löydettiin tiedot NHTSA:n tietokannasta (taulukko 2, taulukko 3). [5].

Taulukko 2. NHTSA-tietokanta, Civic 1998:n hitausmomentit.

NHTSA Civic '98

akseliväli	raideleveys		katon korkeus	paino (N)
	edessä	takana		
2621 mm	1471 mm	1468 mm	1388 mm	11217

painopisteen sijainti			(kg m ²)	
etuakselilta	maasta	nyökkäys	Kallistus	kääntyminen
1038 mm	513 mm	1617 kg·m ²	365 kg·m ²	1785 kg·m ²

Taulukko 3. RX Clio:n lasketut hitausmomentit.

Clio RX 8.3.2017

akseliväli	raideleveys		Katon korkeus	paino (N)
	edessä	takana		
2576 mm	1550 mm	1520 mm	1429 mm	11772

painopisteen sijainti			(kg m ²)	
etuakselilta	maasta	nyökkäys	kallistus	kääntyminen
1087 mm	480 mm	1496 kg·m ²	409 kg·m ²	1786 kg·m ²

Kaikki komponentit oletettiin suorakulmaisiksi särmiöiksi mallintamisen helpottamiseksi. Näitä tietoja ei saatu valmistajalta ja koko auton korin mallintaminen materiaaleineen on liian työlästä. Ideaalisesti hitausmomentit voisi laskea ohjelmallisesti suoraan ajoneuvon CAD-mallien pohjalta. Massakeskipiste määritetään näiden tietojen pohjalta ja sen referenssipiste on auton 3D-mallin pohja. Tunnettujen komponenttien massa vähennetään kokonaispainosta ja oletetaan jäljelle jäänyt erotus korin painoksi.

4.2 Aerodynamiikka

Aerodynaamisista ominaisuuksista tarvitaan ilmanvastuskerroin kerrottuna otsapinta-alalla. Tähän sovelletaan valmistajalta saatua tietoa vastaavan mallisesta siviiliautosta. Valmistajan ilmoittama ilmanvastusarvo on 0,670. Tarkistetaan auton ilmanvastuskerroin; tiedetään, että se on tämän kokoluokan autoille tyypillisesti n. 0,3–0,4 [6]. Koska tiedämme auton leveyden ja korkeuden, voimme laskea otsapinta-alan karkeasti mallinnusohjelman ja etuprofiilista otetun kuvan avulla (kuva 10). Kameran vääristymä muuttaa tuloksia hieman ja se pitää ottaa huomioon tuloksia arvioitaessa. Peilit jätetään pois, koska ne poistetaan ja vaihdetaan pienempiin kilpakäyttöä ajatellen.

Tarkistettuna ilmanvastuskertoimeksi saadaan 0,298 ja otsapinta-alaksi 2,25m².

$$c_{da} = 0,670 \text{ m}^2 = C_D * A \quad (5)$$

$$A = \frac{0,670 \text{ m}^2}{0,350} = 1,91 \text{ m}^2 \quad (6)$$

$$c_d = \frac{0,670 \text{ m}^2}{2,29 \text{ m}^2} = 0,2977 \quad (7)$$



Kuva 10. Esimerkkikuva otsapinta-alan mallintamisesta CAD-ohjelman avulla.

Joseph Katzin esimerkkiarvoista poiketen ilmanvastuskerroin on arvioitua pienempi, mutta ottaen huomioon yleisen ajoneuvotekniikan ja aerodynamiikan kehityksen oletetaan sen olevan lähempänä totuutta [6, s. 48; 263]. Lopullinen arvo tulee olemaan suurempi, kun otetaan huomioon rallicross auton suuremmat jäähdytysaukot ja katolle asennettu ilmanottoaukko. Nämä muutokset kasvattavat hieman ilmanvastuskerrointa ja otsapinta-alaa.

Valmistajan ilmoittamaksi ilmanvastukseksi varmistui myöhemmin Clio CUP -auton osalta $C_{da} = 0,869$ (kuva 11).

98CUP_2014 Release

CLIO CUP

B.5 GENERAL CHARACTERISTICS

Description	Dimensions
SCx	0.869
Front SCz	0.024
Rear SCz	-0.08
Total SCz	0.016

Kuva 11. Ilmanvastus ja nostovoimat [7].

4.3 Ilmavirtauksen aiheuttamat nostovoimat

Ilmanvastuksen aiheuttama voima synnyttää myös nostovoimia ja negatiivisia nostovoimia eli downforcea. Siviiliautossa ei juurikaan ole downforcea, mutta auton aerodynaamiset ominaisuudet aiheuttavat nostetta suurilla nopeuksilla. Nämä arvot saatiin suoraan valmistajalta, myöhemmässä vaiheessa projektia on tarkoitus simuloida auton aerodynamiikkaa mallinnusohjelman avulla. Nostovoimakerroin SC_z on tässä tapauksessa korin pinta-ala A kerrottuna nostovoimakertoimella C_L . Tämä kertoo kappaleeseen kohdistuvat ilmavirtauksen aiheuttamat voimat pystyakselilla, ilmavirtauksen suunnan ollessa kohtisuoraan ajoneuvon edestä.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_L \quad (8)$$

F_L on nostovoima
 ρ on ilman tiheys
 v on ilmavirtauksen nopeus
 A on siiven pinta-ala
 C_L on nostovoimakerroin

Pienissä nopeuksissa ajovastuksen osuus on vähäinen ja myös ilmavirtauksen aiheuttama nostovoima on minimaalinen. Rallicrossissa huippunopeudet jäävät alhaisiksi, ollen nopeimmillakin autoilla Kouvolassa n. 140 km/h. Nostovoimiin ei tämän takia perehdytä kovin tarkasti. Suuria siipiä ja aerodynamiikkaa hyödyntäviin kilpa-autoihin näiden voimien tarkka simuloiminen on äärimmäisen tärkeää, sillä ne vaikuttavat huomattavasti autoon vaikuttaviin voimiin ja sen käyttäytymiseen eri nopeuksissa.

Auto on varustettu myös takaspoilerilla ja diffuusorilla, joiden vaikutus on otettu huomioon auton ilmanvastuksessa ja nostovoimissa.

Diffuusorin toiminta perustuu Bernoullin lakiin, jonka mukaan paine virtauksessa alenee nopeuden kasvaessa. Auton kori toimii siipenä ja auton alapuolella virtaava ilmavirta joutuu kulkemaan pidemmän matkan kuin auton yläpuolella kulkeva virtaus. Tämän seurauksena auton alapuolinen ilmavirtaus kiihtyy ja paine laskee. Paine-eron johdosta syntyy voima joka työntää auton koria alaspäin. Diffuusorin tilavuus kasvaa pituuden myötä auton perää kohti, jolloin saadaan luotua ilmatila, joka auton alla olevan

ilmavirtauksen on täytettävä, tämä synnyttää suuren nopeuseron ilmavirtauksen nopeudessa.

Simuloitavassa ajoneuvossa diffuusori on suhteellisen lyhyt ja auton perä on korkealla, jolloin ilmavirtaus irtautuu korin pinnasta ja diffusorin vaikutus on suhteellisen heikkoa. Diffusorin käytännön hyödyt vastaavassa ajoneuvossa ovat lähinnä aerodynaamisen tasapainon parantamisessa ja varsinaista autoa alaspäin työntävää voimaa ei saada aikaan.

Koska valmistajalta saatiin tietoa autoon vaikuttavista nostovoimista, lisättiin malliin nämä nostovoimakertoimet etu- ja taka-akselille noin auton massakeskipisteen korkeudelle. Nostovoimien vaikutuksen auton käyttäytymiseen pitäisi olla vähäistä ja niiden vaikutuksesta autoon varmistuttiin kokeilemalla auton käyttäytymistä huippunopeudessa. Kyseisen auton ei pitäisi ylio hjautua häiritsevästi vielä 200 km/h nopeudessa aerodynaamisen nosteen voimasta. Muutaman testivedon jälkeen auton todettiin käyttäytyvän oletetulla tavalla.

4.4 Iskunvaimentimet ja jousitus

Iskunvaimentimien määrittäminen on äärimmäisen tärkeää, sillä pitkä joustomatka ja radan epätasaisuudet vaikuttavat huomattavasti auton käyttäytymiseen. Iskunvaimennin auttaa hallitsemaan jousituksen värähtelyjä ja pitämään renkaat maassa jousitukseen kohdistuvista iskuista huolimatta.

Iskunvaimentimien suorituskyky mitataan dynamometrillä ja saatua mittausdataa sovelletaan suoraan käytännössä. Simulaattorissa iskunvaimentimille on määritetty kaksi eri nopeusaluetta, mitatusta datasta otetaan kaksi kiintopistettä ja määritetään kulmakerroin, jolla toistetaan mitattu tulos mahdollisimman tarkasti.

Tällä kertaa iskunvaimentimien valmistaja ei luovuttanut tietoja autoon tilauksesta tehdyistä vaimentimista, joten iskunvaimentimien arvot lasketaan tiedetyistä arvoista ja sovelletaan koulusta opittuja menetelmiä. Koska käytettävät jouset tiedetään, voidaan laskea jousitetun massan ominaisvärähtelytaajuus (kaava 9) ja kriittinen vaimennus (kaava 10). Kriittisen vaimennuksen perusteella voidaan valita lähtöarvot käytettäville vaimentimille.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (9)$$

$$k_{kr} = 2 \cdot D \sqrt{c_K \cdot m_j} \quad (10)$$

f on ominaisvärähtelytaajuus

K on jousien jäykkyys N/m

M on jousitettu massa

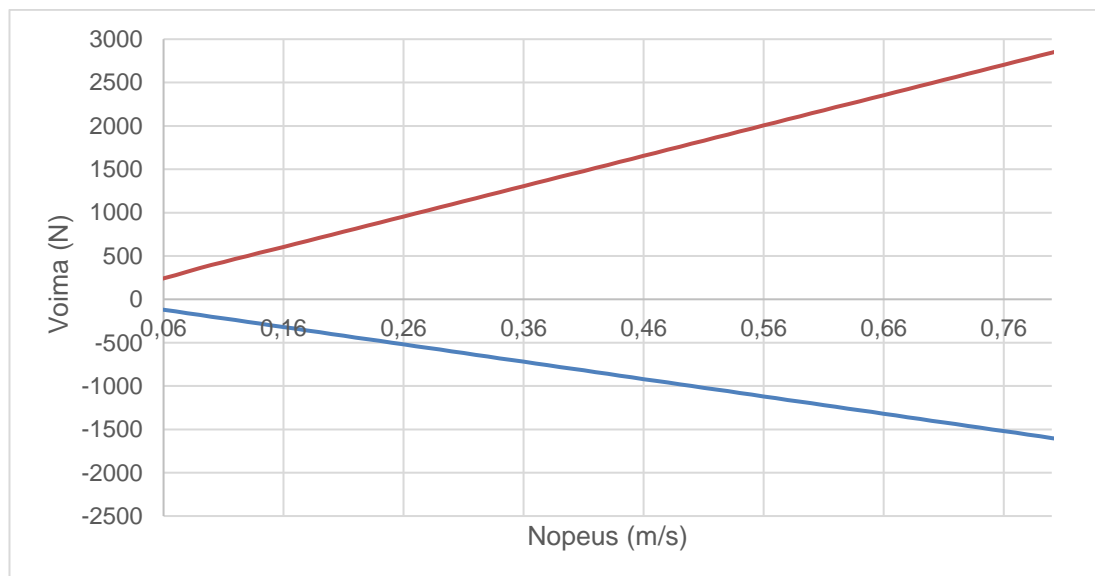
K_k on vaimennuskerroin. Kriittinen vaimennus, kun $D = 1$

C_k on joustojäykkyys pyörällä

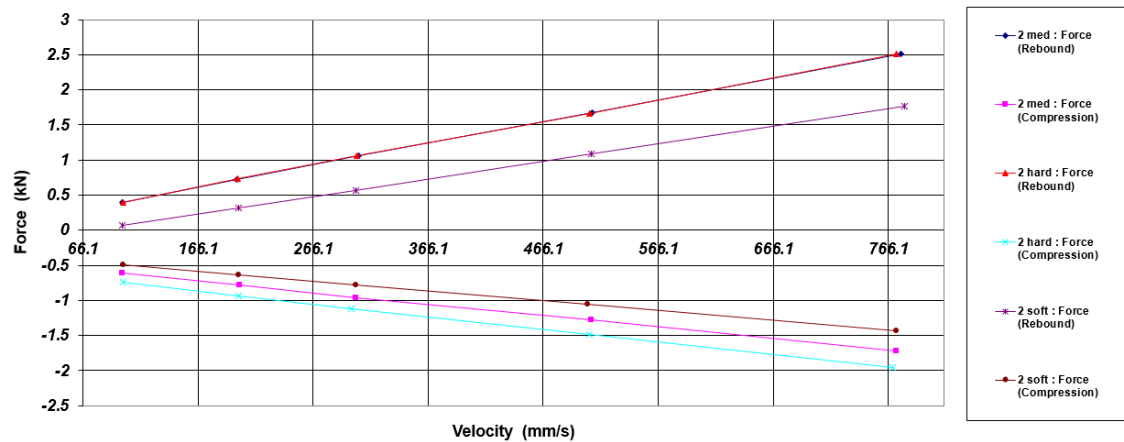
M_j on jousitettu massa

Korin ominaisvärähtelytaajuus on noin 1,9 Hz, takapään värähtelytaajuuden ollessa noin 7,5 % suurempi. Pitkästä joustomatkasta ja epätasaisesta ajoalustasta johtuen sisäänjouston vaimennus jätetään pienemmäksi ja paluujouston vaimennus säädetään kaksinkertaiseksi sisäänjouston vaimennukseen verrattuna. Vaimennuskertoimena lähtöarvoille käytetään kerrointa 0,25 ja pyöristetään ylöspäin. Näin saadaan oletussäädöksi etuakselille 2000 Ns/m sisäänjoustoon ja 4000 Ns/m ulosjoustoon. Iskunvaimentimen säädöiksi määritellään 1 säätö on 250 Ns/m ja säätövaraksi 1500–5500 Ns/m, jolloin saadaan 16 eri säätöä per iskunvaimennin.

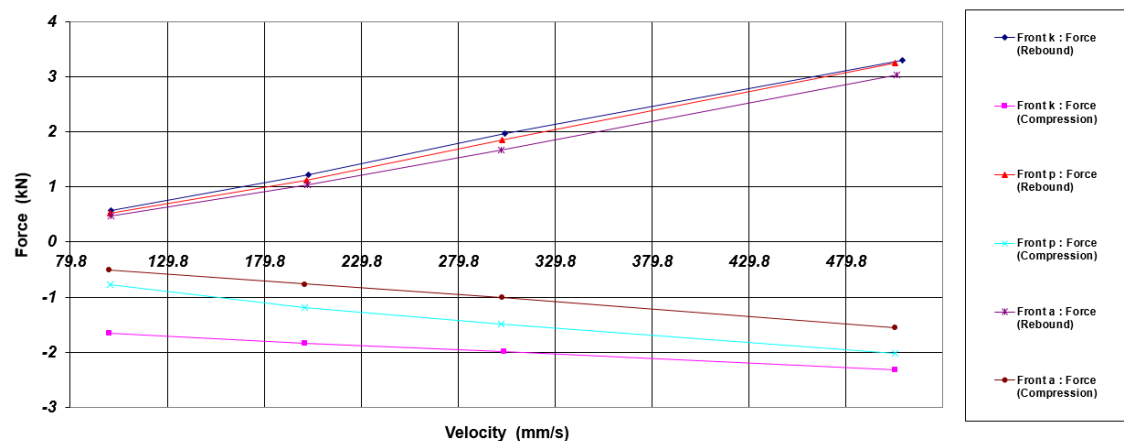
Toteutunut iskunvaimentimen vaimennus on hyvin lineaarinen, eikä ole selvää porrasta nopean ja hitaan vaimennuksen välillä (kuva 12). Oletussäätöjä verrattiin yhteistyökumppanilta saatuihin tietoihin ja niiden todettiin vastaavan käytössä olevia oikeita vaimentimia (ks. kuvat 13, 14).



Kuva 12. Clio RX, oletusarvot iskunvaimentimen jäykkyydelle.



Kuva 13. Esimerkkikuva vastaavasta vaimentimesta, Rallysystems.



Kuva 14. WRC-auton vaimennin, sora, Rallysystems.

Iskunvaimentimien kallistuskulma ja sijainti suhteessa pyörän napaan täytyy määrittää erikseen HDV-tiedostoon, eikä se vaikuta etupyörien kääntöakseliin toisin kuin McPhersonilla varustetussa oikeassa ajoneuvossa.

Tiedostossa on mahdollista ottaa käyttöön kaksi eri tapaa ottaa huomioon jousien joustojäykkyyden väheneminen jousitusgeometrian ja jousituksen liikkeiden johdosta. Se onnistuu joko staattisella kertoimella, joka lasketaan jousituksen lepoasennosta tai se voidaan laskea reaaliajassa jousituksen, pyörän navan ja tukivarsien liikkeestä. Staattiset kinemaattiset kertoimet eli joustojäykkyys saatiin suoraan valmistajalta ja ne ovat edessä 1,03, takana 1,04. Autoa testatessa jousitusta kokeiltiin ensin kiinteällä

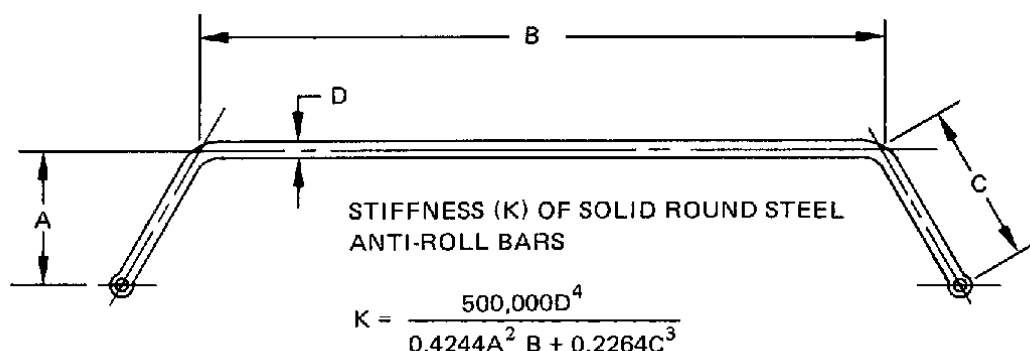
kertoimella ja jousituksen toiminnan varmistuttua siirryttiin käyttämään reaaliaikaista kerrointa. Kaksoiskolmiotukivarsi rakenteesta huolimatta jousitusgeometriat suunniteltiin niin, että joustojäykkyys ei muutu huomattavasti liikkeessä.

4.5 Kallistuksenvakaajat

Mallinnettava auto on varustettu kallistuksenvakaajilla sekä etu- että taka-akselilla. Kallistuksenvakaajalla vähennetään korin kallistelua kaarreajossa. Kaarreajossa ulompi pyörä joustaa sisään ja sisempi pyörä joustaa ulos. Kallistuksenvakaajan avulla vähennetään sisemmän pyörän ulosjoustoa ja samalla ajoneuvon korin kallistumista kohti ulkokaarretta. Vakaajatanko kiertyy akselinsa ympäri ripustukseen asennettujen vipuvarisen avulla ja välittää voiman renkaalta renkaalle. [8, s. 4]

Simulaattoriin kallistuksenvakaajan parametrit voi syöttää kahdella tavalla: joko perustuen sen mittoihin ja halkaisijaan tai syöttämällä suoraan jousivakio N/m kerrottuna kahdella.

Mallinnettava ajoneuvo on varustettu etuakselilla 22,5 mm:n kallistuksenvakaajalla. Tässä vaiheessa kallistuksenvakaajasta ei saatu vielä tarkkoja mittoja, mutta sen jäykkyyttä arvioitiin soveltamalla Fred Puhnin esittämää kaavaa jäykkyyden laskemiseksi. On huomioitava, että kyseinen metodi toimii vain amerikkalaisella yksikköjärjestelmällä. (Kuva 15).



Kuva 15. Kallistuksenvakaajan jäykkyyden arvioiminen. [9].

$$K = \frac{500000 * 0.886 \text{ in}^4}{0.424 * 11.811 \text{ in}^2 * 52 + 0.2264 * 11.811 \text{ in}^3} \quad (11)$$

$$K = 89.340 \frac{\text{lbs}}{\text{in}} \quad (12)$$

$$K = 1.595 \frac{\text{kg}}{\text{mm}} \quad (13)$$

4.6 Pyörien suuntaus ja säätövarat

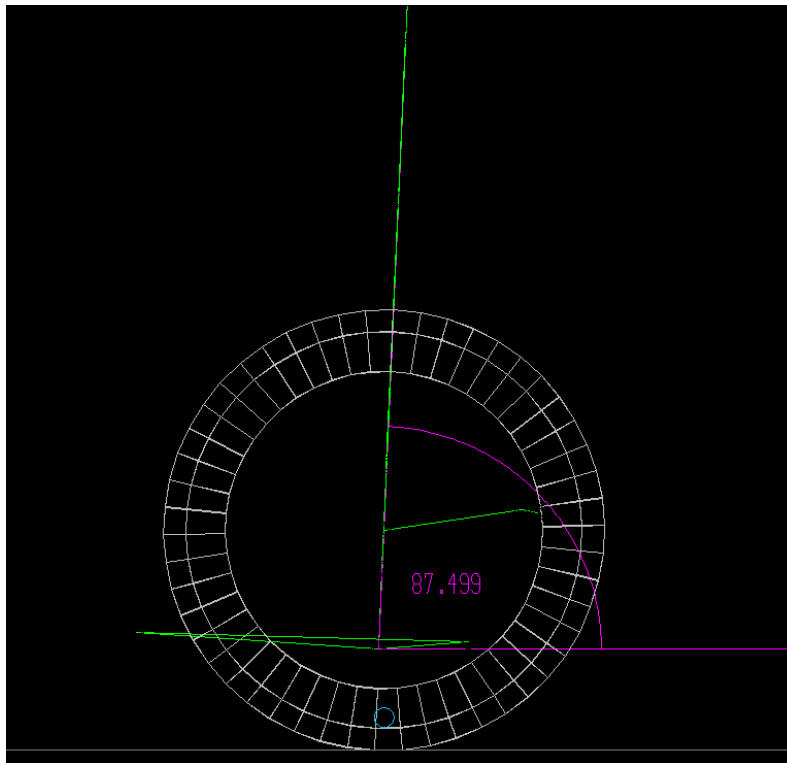
Pyörien säätövarat ja lähtötilanne pyörien suuntaukselle täytyy määrittää simulaattoriin. Pyörien liike on osittain riippuvaista jousitusgeometriasta, mutta koska fyysisiä esteitä ei oteta huomioon, täytyy määrittää niiden äärisäädöt.

Pyörille määritetään auraus, haritus ja kääntösäteen rajat lähtötilanteessa (taulukko 4). Muita pyöräntulmiin vaikuttavia muuttujia ovat jousitusgeometria, ohjausvarsien pituus ja sijainti sekä raidetangon välityssuhde. Oikein määritellyillä arvoilla ohjausvaste ja ohjauspyörän kääntöasteet vastaavat oikeaa tilannetta. Raidetangon välityssuhteeksi oletetaan 24:1, mutta säätövaraa jätetään runsaasti.

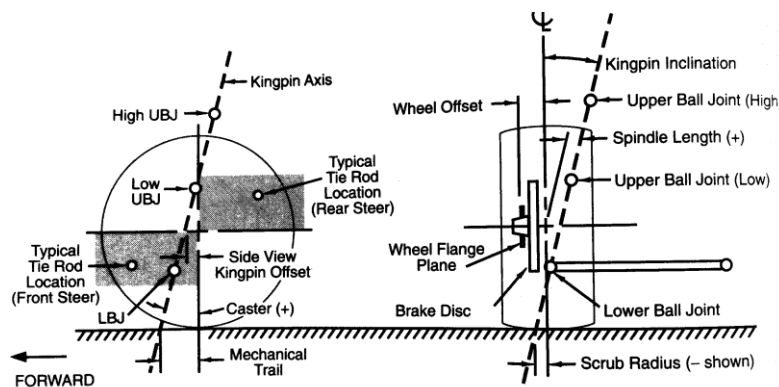
Taulukko 4. Pyöräntulmien ja ohjauksen oletussäädöt

Caster	4.5°
Camber	
etu	1.5°
taka	1.5°
Toe	
etu	0°
taka	0.9°
Ratin kääntöasteet	540°
Renkaiden kääntöaste	22.5°

4.6.1 Renkaan kääntöakselin sivu- ja takakallistuma



Kuva 16. Caster-kulman esimerkki, Lotus Shark. Huom. caster-kulma = $90^\circ - 87,499^\circ$, kulkusuunta vasemmalle



Kuva 17. Havaintokuva kääntöakselista KPI/caster [10, s. 710].

Caster-kulma eli kääntöakselin takakallistuma (ks. Kuva 16, 17) kulkee McPherson-tyylisessä ratkaisussa joustintuen yläpään ja alapallonivelen kautta vierintäpinnan tasoon, kaksoiskolmiotukivarressa se kulkee ylemmän ja alemman tukivarren ulompien kiinnityspisteiden kautta vastaavalla tavalla. Yleistynyt käytäntö on, että positiivinen

caster-kulma tarkoittaa kääntöakselin olevan kallistettu kulkusuuntaan nähden pystyakselista taaksepäin.

Caster-jättämässä renkaan kosketuspinta seuraa kääntöakselia jäljessä sivusta katsottuna. Mitä enemmän caster-jättöä, sitä suuremmalla momenttivarrella renkaan sivuttaisvoimat vaikuttavat kääntöakselilla. Tämä aiheuttaa keskittävän voiman, joka on valtaosa ohjausta palauttavasta voimasta kääntöakselilla ajoneuvon ollessa liikkeessä.

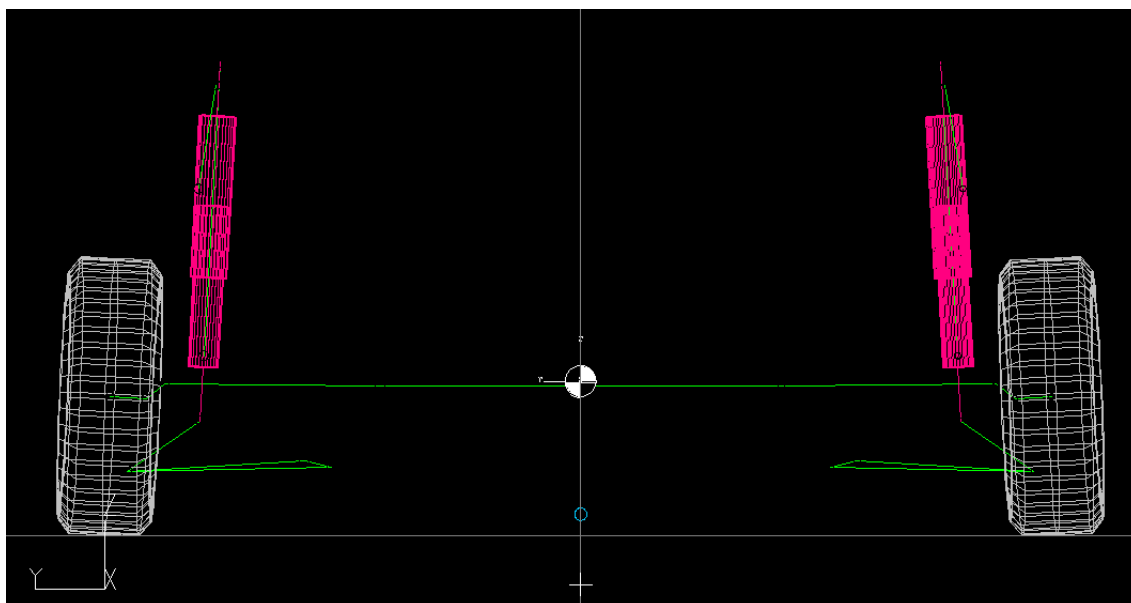
Osa caster-jättämää on ns. pneumaattinen jättämä joka johtuu renkaan ominaisuuksista. Pneumaattinen jättämä on epälineaarinen sivuttaisvoimien suhteen ja sen osuus rengasta keskittävästä voimasta lähestyy nollaa, kun rengas saavuttaa pidon rajan. Tämä on merkittävä osa ajotuntumaa ja helpottaa kuljettajaa tuntemaan, milloin renkaat ovat pidon rajamailla. Caster-kulman ollessa suuri, pneumaattisen jättämän osuus kokonaisvoimista on pienempi, jolloin sitä voi olla vaikeampi havaita.

Positiivinen caster aiheuttaa myös camber-kulman muutosta kääntäessä, kaarteeseen ulkopuolisen renkaan kallistuessa yläreunasta sisäänpäin ja sisäpuolisen renkaan kallistuessa ulospäin.

Caster-kulman vaikutuksesta myös renkaat pyrkivät nousemaan/laskemaan kääntämisen johdosta. Vaikutus on käänteinen eri puolilla, positiivisella caster-kulmalla sisäpuolen rengas pyrkii nousemaan mutkassa, tämä aiheuttaa painonsiirtoa diagonaalisesti joka saa aikaan yliohtautuvuutta. [10, s. 31, 712.]

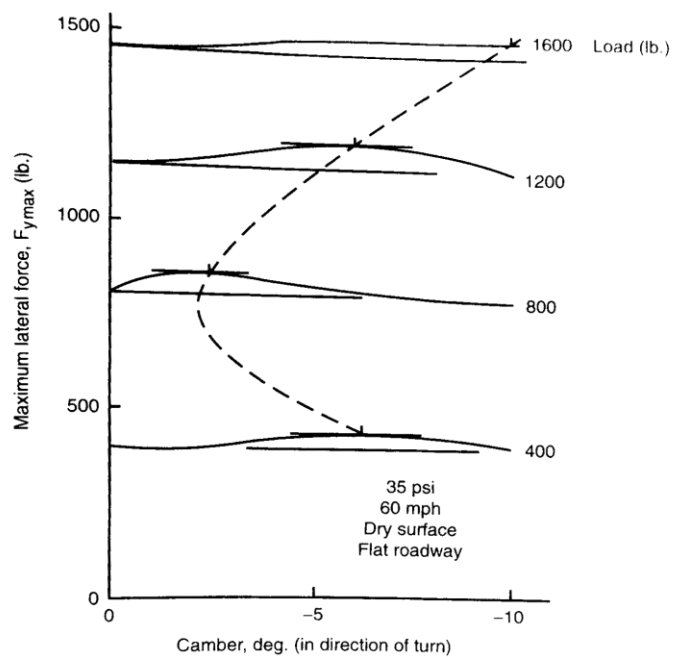
Kääntöakselin sivukallistumasta käytetään lyhenteitä SAI ja KPI. McPherson-tuennassa on aina sivukallistumaa, jotta iskunvaimentimella on tilaa liikkua ja mitä suurempi sivukallistuma on, sitä enemmän auton keula pyrkii nousemaan renkaita käännettäessä. Positiivinen KPI-kulma aiheuttaa aina camber-kulman muutosta ulospäin renkaan kääntyessä. Kuvassa 16 negatiivisena esitetty kääntövierinsäde, Scrub Radius toimii momenttivartena renkaalta välittyville voimille. Lyhyt kääntövierinsäde minimoi renkaalta ohjauslaitteelle välittyvien voimien vaikutuksia. Negatiivisella kääntövierinsäteellä on ohjausta keskittävä ominaisuus, jolloin jarruttaessa pyörä pyrkii kääntymään auralukselle ja pidon kadotessa vedon aikana vastapuolen rengas kääntyy luonnollisesti haritukselle, aiheuttaen vastavoiman, joka pyrkii ohjaamaan autoa suoraan. [10, s. 710.]

4.6.2 Camber-kulma



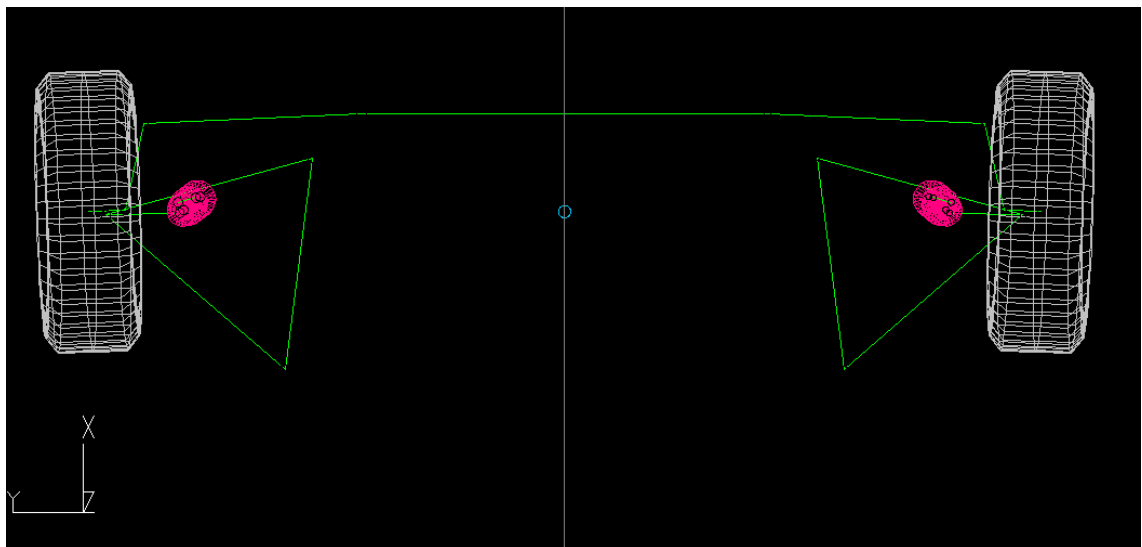
Kuva 18. Positiivinen camber-kulma Mcpherson-tyyppisellä jousituksella

Camber-kulma on renkaan sivukallistuma pystyakselilla maatasoon verrattuna. Kallistettuna rengas pyrkii kääntymään suuntaan, johon se on kallistettu. Ajoneuvossa rengas on kuitenkin pakotettu kulkemaan suoraan, rengasta kallistamalla saadaan kehitettyä sivuvoimia ja voidaan estää renkaan taittumista alle. Nämä sivuvoimat aiheuttavat myös ohjausta suoristavia voimia suoraan ajaessa. Mikäli camber-kulmat ovat erisuuruisia eri puolella, pyrkii ohjaus puoltamaan suuremman camber-kulman suuntaan. Suoraan ajaessa renkaan kosketuspinta-ala on kuitenkin pienempi ja suuret camber-kulmat huonontavat renkaan vetopitoa huomattavasti. [10, s. 46.]



Kuva 19. Renkaan sivuttaisvoiman huippuarvo camber-kulman suhteen [10, s. 46].

4.6.3 Auraus ja haritus



Kuva 20. Havaintokuva renkaiden aurauksesta, Lotus Shark.

Aurauksesta ja harituksesta puhutaan silloin, kun ylhäältä katsottuna renkaiden etureunat eivät ole yhtä kaukana toisistaan. Aurauksesta silloin, kun renkaiden etureunat ovat lähempänä toisiaan.

Aurauksella ja harituksella voidaan kompensoida renkaan vierintävastuksen aiheuttamia sivuvoimia ja aurausta käytetään joskus minimoimaan camber-kulman aiheuttamia rengasta kääntäviä sivuvoimia ja momentteja.

Siviiliautoissa renkaiden auraus pyritään pitämään vähäisenä renkaan kulutuksen ja vierintävastuksen minimoimiseksi. Kilpa-ajoneuvoissa saatetaan käyttää haritusta etuakselilla sen aiheuttamien sivuttaisvoimien luoden esijännitystä renkaalle, jolloin rengas saadaan lämpiämään ja reagoimaan herkemmin ohjausliikkeisiin mutkaan käännettäessä. Taka-akselilla haritusta ulosjouston seurauksena voidaan käyttää auttamaan auton kääntymistä kaarreajon alkuvaiheessa.

4.7 Voimansiirto

Voimansiirto sisältää kaikki ajoneuvon voimansiirron parametrit moottoria lukuun ottamatta. Näillä määritetään ajoneuvon vetotapa, vaihteiston välitykset ja vaihteiden lukumäärä, kytkimen inertia ja voimansiirtokyky sekä tasauspyörästön lukkojen ominaisuudet.

Vetotapa määrittää kumpaa akselia käytetään voiman välittämiseen ja on mahdollista simuloida myös nelivetoista ajoneuvoa. Vaihteiston välitykset ovat erillisessä tiedostossa, mikä tarjoaa mahdollisuuden säätää autoa käyttämällä useampia erilaisia välityksiä. Tasauspyörästön lukko määritetään yksinkertaisesti arvioimalla voiman jakautuminen vetävien pyörien kesken tilanteessa, jossa kiihdytetään tai jarrutetaan pyöriä.

Auto on varustettu Sadev ST82/17 -vaihdelaatikolla ja 30/80-rampeilla varustetulla lukitsevalla tasauspyörästöllä. Tasauspyörästön ramppien kulmat määrittävät sen, kuinka suuri osa pyörälle menevästä voimasta välittyy tasauspyörästön kautta, mahdollistaen molempien vetävien pyörien pyörimisen samalla nopeudella luistosta huolimatta. Tällä estetään voiman välittyminen pyörälle, jolla on vähemmän pitoa. Näin saadaan parempi kiihtyvyys kaarteiden ulostulossa.

Tässä tapauksessa valmistajan ilmoittamat tiedot tarkoittavat, että vedon ollessa päällä tasauspyörästö on lähes kokonaan lukossa, voima välittyy tasaisesti molemmille pyörille ja kaasunostettaessa pyörimisnopeuserot pyörien välillä ovat mahdollisia.

Tasauspyörästäön välittämä voima voidaan laskea, koska tiedetään ramppikulmat ja tasauspyörästäön esijännitys.

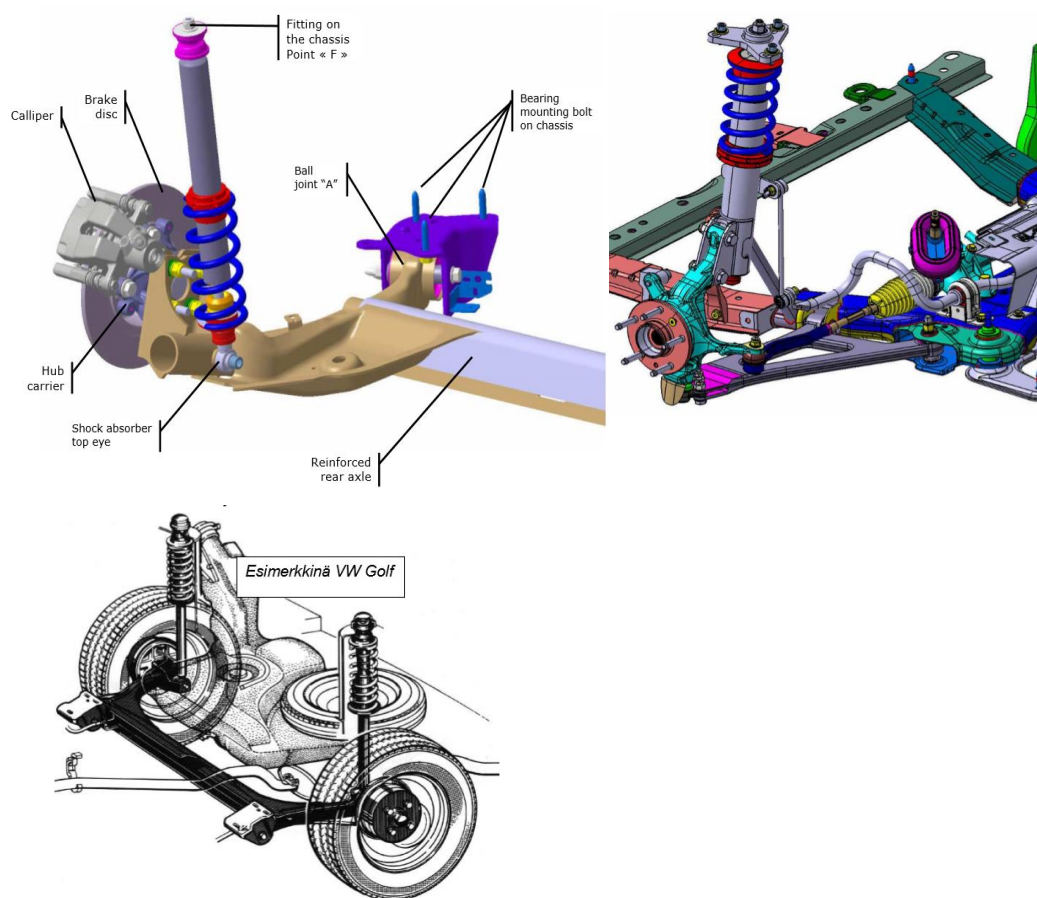
$$T_D = CT + B \quad (14)$$

T_D on Tasauspyörästäön välittämä voima N
 C on Ramppikulman kerroin (ramppikulman kosini)
 T on Pyörälle välittyvä voima
 B on Tasauspyörästäön esijännitys N

Esijännitykseksi määriteltiin 50 Nm – 170 Nm valmistajalta saatujen tietojen perusteella ja ramppikulman kertoimeksi 0,866 voimaa välittäessä sekä 0,173 jarrutettaessa.

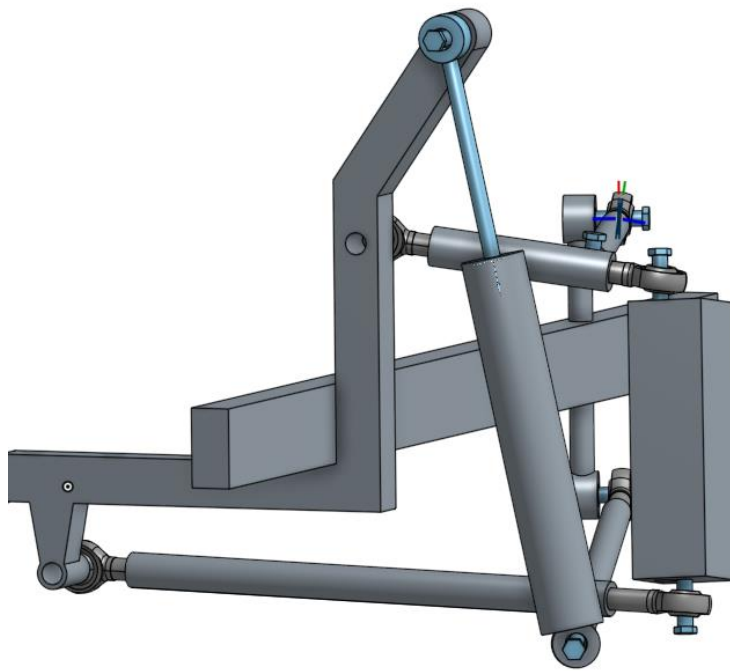
4.8 Jousituksen geometriat

Auton jousitusgeometrian mallintaminen on tämän projektin haastavin osuus renkaiden ohella. Mallinnettavassa ajoneuvossa on etuakselilla McPherson-pyöräntuenta ja taka-akselilla yhdysheilurijousitus (kuva 20). Simulaattorilla on mahdollista mallintaa päällekkäiset kolmiotukivarret ja jäykkä akselirakenne edessä ja takana, mutta se ei tue suoraan kumpaakaan jousitusgeometriaa. Ennen auton valintaa tarkoituksena oli mallintaa putkirunkoinen ajoneuvo päällekkäisillä kolmiotukivarsilla, mutta sopivaa yhteistyökumppania ei löytynyt.



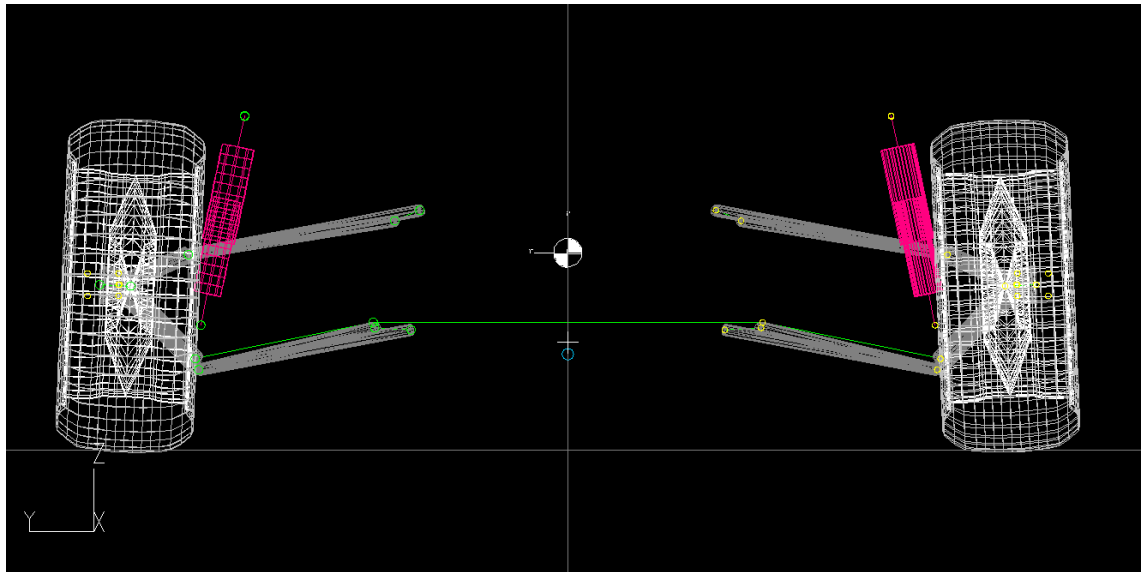
Kuva 21. Ylh. Clion akselistorakenne Clio Cup 2014 User Manual. Alh. esimerkkikuva Autotekniikan opetusmateriaali, VW Golf.

Jousitusgeometrian mallintamisessa voidaan käyttää joko monia kaupallisia ohjelmia, joista maininnan arvoisia ovat mm. susprog3D, Lotus Shark ja OptimumKinematics tai vaihtoehtoisesti CAD-mallinnusohjelmia kuten Catia V5/6 ja Onshape. Jousituksen mallintamiseen erikoistuneet ohjelmistot nopeuttavat huomattavasti liikeratojen laskemista automatisoituine toimintoineen. Esimerkkikuvassa (kuva 22) on yksinkertainen animoitu liikemalli Legends-kilpa-auton etujousituksen geometriasta CAD-ohjelmalla tehtynä.



Kuva 22. Legends-kilpa-auton etujousitus.

Pyörien kallistuskulman muutoksia suhteessa jousituksen ja korin liikkeisiin pyritään toistamaan mahdollisimman tarkasti tekemällä ensin malli autosta Lotus Shark -ohjelmalla (kuva 23) ja sen jälkeen soveltamalla tästä saatua dataa uuteen kolmiotukivarsirakenteeseen. Auto mallinnetaan myöhemmin toiseen simulaattoriin, jolla voidaan simuloida näitä alustaratkaisuja, mutta se ei ole ajankäytön kannalta mahdollista tässä insinöörityössä.



Kuva 23. Etujousitus kolmiotukivarsilla.

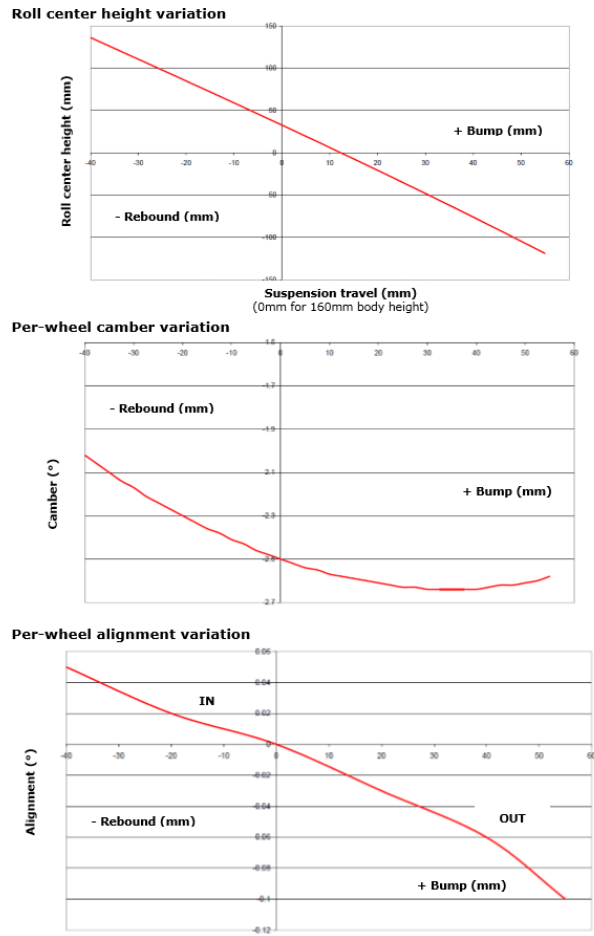
Simulaattoriin jousituksen tukivarsien sijainnit määritetään alku- ja loppukoordinaateilla jokaisen yksittäisen tukivarren suhteen. Etäisyydet annetaan sisäpuolelta *Pos* suhteessa ajoneuvon korin 3D-mallin keskipisteeseen ja ulkopuolelta *Neg* suhteessa tukivarren puoleisen navan ja tukivarsien muodostamaan massakeskipisteeseen.

$$Pos = (-0.2780207, 0.0222219, -1.0165349)$$

$$Neg = (-0.6545037, -0.0486069, -0.9437323)$$

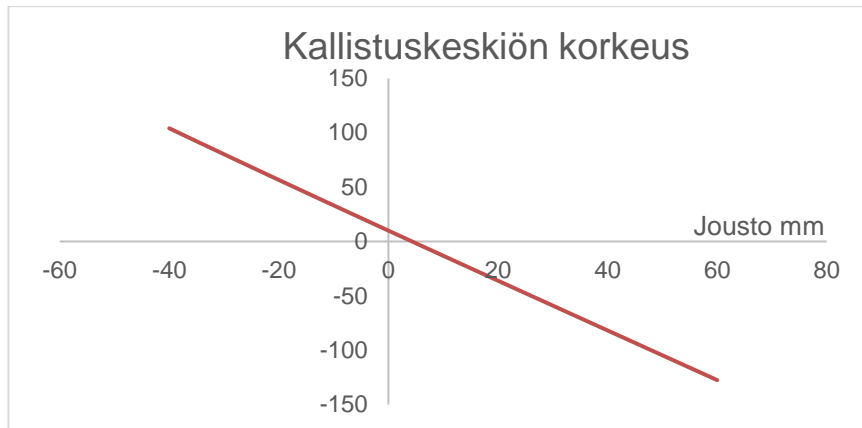
Koordinaatit voidaan siirtää yksinkertaisen muutostyön jälkeen suoraan simulaattoriin. Tätä helpottamaan tehtiin taulukkopohja, jolla on helppo muuttaa koordinaatit suoraan Lotus Shark -ohjelmasta simulaattorin ymmärtämään muotoon.

Etuakseli mallinnettiin valmistajan antamien tietojen pohjalta. Valmistajalta löytyi tieto yksittäisen renkaan kulman muutoksista etuakselilla Cup-auton perussäädöillä (ks. kuva 24).

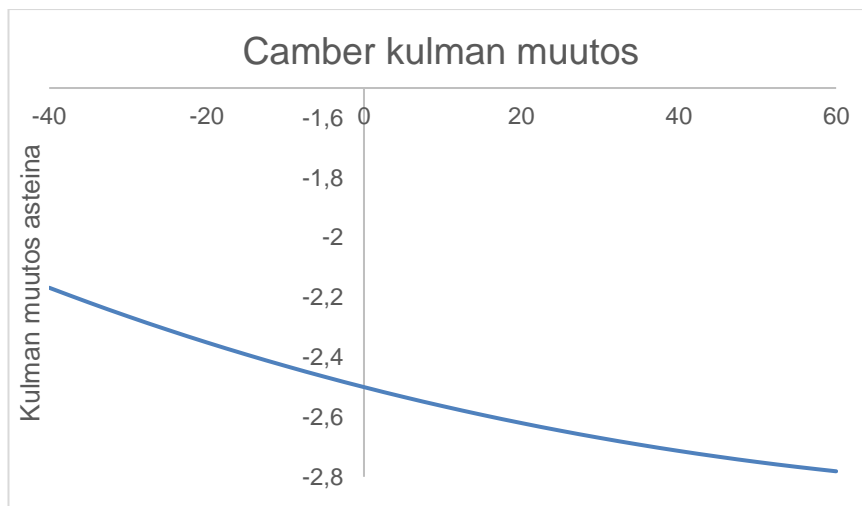


Kuva 24. Kulmamuutokset joustossa, Clio Cup User Manual

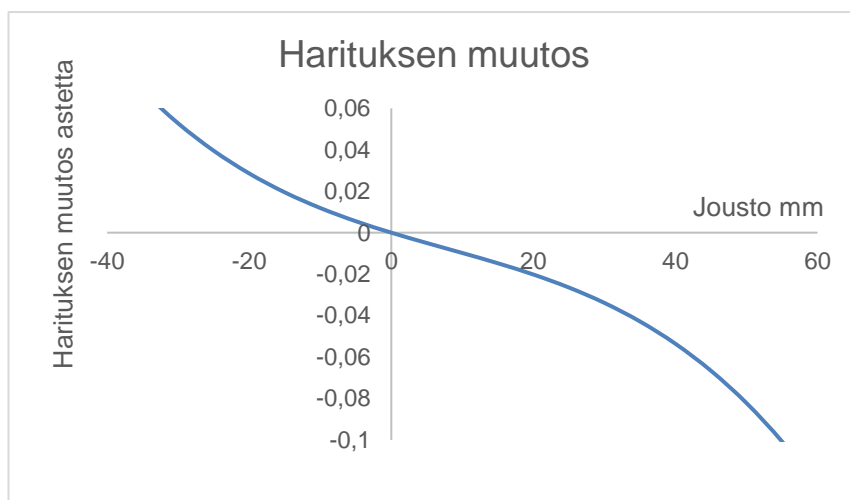
Etuakselille rakennettiin vastaavasti toimiva etujousitus kaksoiskolmiotukivarsilla ja sen kallistuskeskiön korkeus (kuva 25) ja kulmamuutokset (kuvat 26, 27) pyrittiin mallintamaan niin että ne vastaavat autosta mitattuja arvoja. Simuloidulta jousitukselta laskettiin arvot vastaavalta joustomatkalta 5 mm:n mittausvälein.



Kuva 25. Kallistuskeskiön korkeuden muutos joustossa, nollakohta 160 mm



Kuva 26. Camber-kulman muutos joustossa.

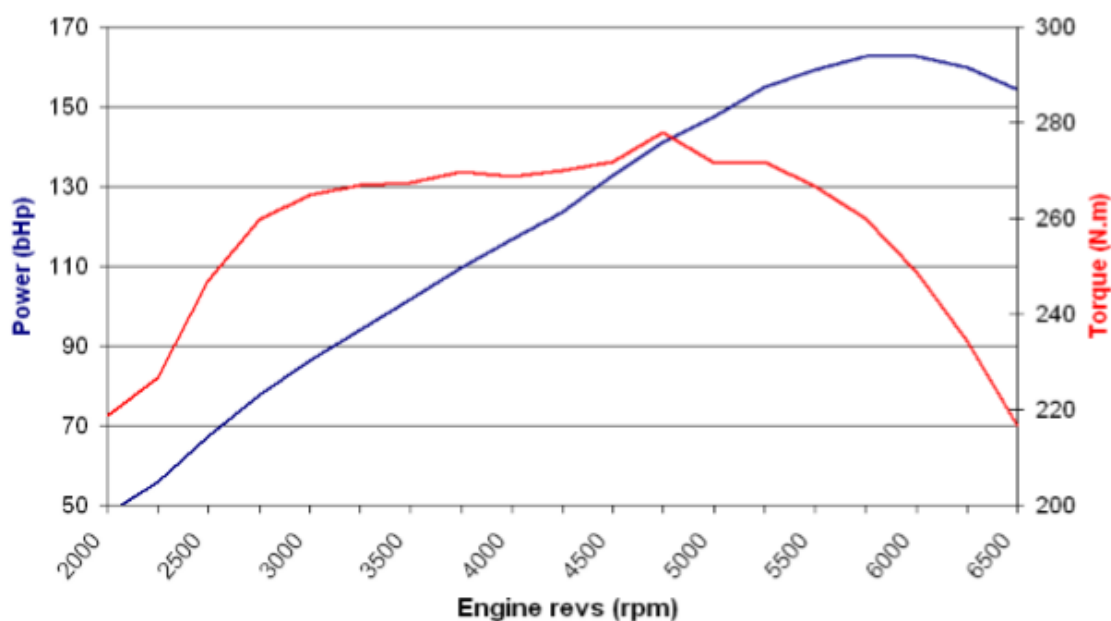


Kuva 27. Joustoauraus/haritus

Taka-akselin mallintaminen on haastavampaa vääntösauvajousituksen ominaisuuksien johdosta. Vastaavan jousitusratkaisun toteuttaminen kolmiotukivarsilla on lähes mahdotonta ilman kompromisseja. Yhdysheilurijousituksessa tasajoustossa renkaan kallistuskulma ei muutu juuri lainkaan, mutta vastaavan käytöksen mallintaminen kolmiotukivarsilla on käytännössä mahdotonta. Mikäli renkaan kallistuskulma ei muutu joustossa, on raideleveyden muututtava tukivarsien liikkeen seurauksena.

4.9 Moottori

Autossa on 1618 kuutiosenttimetrin muuttuvilla venttiilinajoituksilla varustettu turboahdettu polttomoottori. Käytettävässä simulaattorissa muuttuvaa venttiilinajoitusta ja turboahdinta ei voida mallintaa yksityiskohtaisesti. Moottorin vääntömomentti mitataan joko pyöriltä tai moottoridynamometrissä. Pyöriltä mitattu vääntömomentti voidaan syöttää suoraan parametreina eri kierroslukualueille (kuva 28).



Kuva 28. M5MA 400 -moottorin vääntöarvot, Clio Cup User Manual

Polttoaineenkulutus ja lämpöarvot jäävät myöhempään tarkasteluun, sillä autoa päästään testaamaan ensimmäisen kerran vasta tulevana kesänä. Polttoaineen kulutus on hoidettu simulaattorissa yksinkertaisella kertoimella moottorin kierrosluvun ja kaasupolkimen asennon suhteen.

4.10 Renkaat

Simulaattorissa renkaiden mallintamiseen sovelletaan Hans Pacejkan semiempiiristä mallinnusmenetelmää, nk. Magic Formula -kaavakokoelmaa. Sen avulla renkaan käyttäytymistä voidaan simuloida interpoloimalla mitattuja arvoja.

Täysi malli sisältää useita muuntokertoimia ja 2010 esitelty malli sisältää jo 101 parametria. Tässä työssä käytetään jo aiemmin simulaattoriin mallinnettua rengasta ja mahdollisesti muokataan hieman muuntokertoimia, jotta voidaan simuloida krossirenkaan pitoa soralla. Uuden renkaan mallintaminen ei ole mahdollista tällä hetkellä käytössä olevilla resursseilla ja sen mallintamiseen tarvitaan mittauslaitteita tai mittausdataa suoraan renkaan valmistajalta.

Yhtälön yksinkertaistettu perusmuoto on

$$y = D \sin[C \arctan\{Bx - E(Bx - \arctan Bx)\}], \quad (15)$$

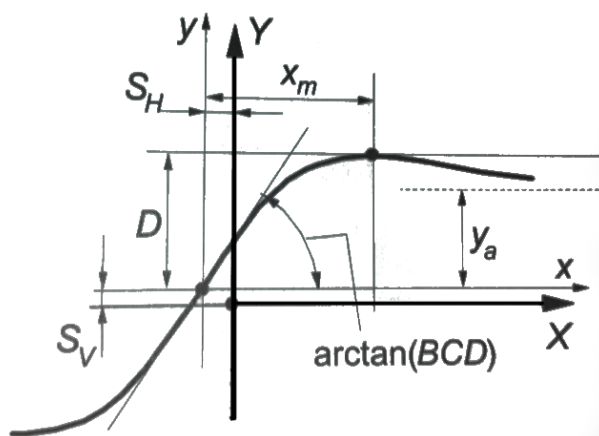
missä

D on Huippuarvo

C on Muotokerroin

D on Huippuarvo

E on Kaarevuuskerroin.



Kuva 29. Magic Formula havaintokuva, Hans Pacejka [11]

Pidon mallintaminen sorapinnalla on haastavaa ja vetopidon simuloiminen staattisella pitokertoimella ei ole suositeltavaa alustan dynaamisuudesta johtuen. Rengas pitää huonosti pienillä luistomäärillä, mutta suuremmilla luistomäärillä pitkittäissuunnassa pito

on soralla parempi. Luistava rengas tunkeutuu päällimmäisen kerroksen läpi tehokkaammin, jolloin pito ja renkaan kuormitus kasvavat, mutta suurilla nopeuseroilla pintojen välillä tämä vaikutus loppuu jossain vaiheessa.

Rengastiedostoon määritellään renkaan elastiset ominaisuudet, lämpöominaisuudet ja normalisoitu voima pitkittäis- ja sivuttaissuunnissa.

Simulaattorissa voidaan määrittää ajettavalle alustalle erikseen kitkakerroin ja vierintävastuskerroin, mutta mallinnustavasta johtuen sorarengas pitää luistossa liikaa kovilla pinnoilla. Simulaattorissa oletusarvo alustan kitkakertoimeksi on 1 ja silloin käytetään suoraan rengasdataan määriteltyjä huippuarvoja.

Testiradaksi on valittu maanmittaustietojen pohjalta mallinnettu Tykkimäen rallicross rata, jolle oli määritelty asvaltille pitokertoimeksi 1, betonilaatoille 0,9 ja soraosuuksille 0,8.

5 Toteutus

Pohjaksi työlle valittiin 23.1.2017 julkaistu harrastajien tekemä ajoneuvo. Tästä pyydettiin lupa käyttää grafiikoita ja ääniä, mutta fysiikat tehtiin kokonaan uudestaan oikeiden tietojen perusteella. Muokkaamaton versio autosta oli pienistä joustovaroista ja kovasta alustasta huolimatta liian nopea ja tehokas, ollen useita sekunteja nopeampi kierroksella kuin supercross-autot. Tämä johtui lähinnä auton liioittelusta rengaspidosta ja tehokkuudesta.

Ensimmäiseen ajettavaan testiversioon tehtiin alustan geometriat kokonaan uudestaan soveltamalla valmistajalta saatuja tietoja. Samalla muutettiin välitykset, voimansiirto, hitausmomentit, ilmanvastukset ja moottorin vääntömomentti. Renkaiden maksimipitoa pudotettiin noin 20 %. Kierrosajat Kouvolassa kasvoivat noin 5 sekuntia. Kierrosajat Kouvolassa olivat muutosten jälkeen parhaimmillaan 43 sekuntia, joka on Matti Alamäen ja Jussi Pinomäen arvioiden mukaan vielä aavistuksen liian nopea. Arvioidut kierrosajat oikealle autolle osuvat 44 ja 45 sekunnin välille.

Kuljettajina ensimmäisissä testeissä toimi allekirjoittanut, Matti Alamäki ja Jukka Leskinen. Myös Jussi Pinomäki saatiin kokeilemaan autoa. Alamäki ja Pinomäki ovat

molemmat kokeneita rallcross-kuljettajia ja heidän mielipiteellään auton käyttäytymisestä on suuri painoarvo projektin onnistumista arvioitaessa.

Testilaitteistona toimivat Foracer- ja X'rcer-simulaattorit, joista ensin mainittu oli varustettu myös liikealustalla. Lopputulokseen oltiin tässä vaiheessa tyytyväisiä, mutta auton todettiin aliohjaavan hieman odotettua enemmän. Aliohjausta korjataan tarkistamalla taka-akselin liikeratoja ja muuttamalla renkaan vetopitoa. Harituksen lisääminen taka-akselille paransi auton kääntyvyyttä mutkan alussa, mutta renkaan pitoa ei muutettu vielä tässä vaiheessa.

Auton kehitystä jatketaan vielä insinööriyön valmistuttua ja parhaat arviot auton suorituskyvystä saadaan kesällä sarjaan osallistuvien kuljettajien toimesta. Kuljettajia varten tehtiin kyselylomake, johon arvioidaan simuloinnin onnistumista eri osa-alueilla. Tarkoituksena on ajattaa sarjan kuljettajia testien yhteydessä simulaattoreilla, jolloin on helpointa verrata simuloidun ajoneuvon suorituskkyä oikeaan ajoneuvoon.

6 Yhteenveto

Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Soft Diamond Oy:n kanssa. Tarkoituksena päivittää yrityksen käytössä ollut ajoneuvomalli uudempaan ohjelmistoon, tutkia mahdollisuutta mallintaa myös uutta kalustoa ja mikäli se on mahdollista, mallintaa uusi ajoneuvo. Vanhan ajoneuvomallin päivittäminen onnistui hyvin ja uuden ajoneuvon mallintaminen aloitettiin etsimällä yhteistyökumppania moottoriurheilun ammattilaisista. Yhteistyökumppanin varmistuttua aloitettiin uuden ajoneuvon fysiikoiden mallintaminen, tarkoituksena saada valmiiksi ajettava malli kesään 2017 mennessä.

Työn valmistelu aloitettiin keräämällä kaikki mahdolliset tiedot mallinnettavasta ajoneuvosta ja perehtymällä simulaattorin tapaan mallintaa ajoneuvon ajodynamiikkaa. Ongelmaksi osoittautui ajoneuvon jousituksen mallintaminen ohjelmiston puutteellisista toiminnoista johtuen. Ajoneuvo päätettiin kuitenkin mallintaa valmiiksi ja koska ohjelmiston puutteet tiedettiin, yritettiin päästä vastaavaan lopputulokseen erilaisesta jousitusmallista riippumatta.

Autoa mallintaessa testaaminen päätettiin hoitaa pääosin yhdellä radalla, josta kaikilla osapuolilla oli eniten kokemusta. Autoa testattiin aina, kun fysiikkamalliin tehtiin

muutoksia. Tulosten vertailuun käytettiin telemetriaohjelmistoja ja kuljettajien arvioita ajoneuvon simuloinnin onnistumisesta.

Ensimmäinen ajettava versio autosta saatiin valmiiksi maaliskuussa 2017, ja siihen oltiin tyytyväisiä. Auton kaarrekäyttäytymisessä oli kuitenkin vielä parannettavaa. Auton malliin tehtiin pieniä muutoksia paikan päällä ja kehitystä päätettiin jatkaa renkaiden ja auton jousituksen mallinnuksen hienosäädöllä. Seuraavat arviot työn onnistumisesta saadaan toukokuussa 2017, jolloin ajoneuvomallia on tarkoitus esitellä yhteistyökumppaneille ja mallinnettavalla ajoneuvolla ajaville kuljettajille.

Lopputulokseen voidaan kuitenkin olla jo tässä vaiheessa tyytyväisiä, sillä uusi ajoneuvo saatiin mallinnettua onnistuneesti ja kaikki osapuolet olivat tyytyväisiä jo ensimmäiseen versioon. Toisen uuden ajoneuvon malli on työn alla, ja opinnäytetyöstä saatiin hyvä pohja sen kehitykseen.

Lähteet

- 1 Motorsport Engineering. Verkkodokumentti. Kangaloosh Limited.
<<http://www.rfpro.com/applications/motorsport-engineering.aspx>>. Luettu 1.2.2017.
- 2 Lord, Bradley. 2009. Inside Red Bulls Amazing F1 Simulator. F1 Racing, August/2009.
- 3 Salakari, Hannu. 2010. Simulaattorikouluttajan käsikirja. Helsinki: Eduskills Consulting.
- 4 rFactor File Structure. Verkkodokumentti. rFactor-League.com.
<<http://www.rfactor-league.com/rFactor/rFactorFiles.html>>. Luettu 2.2.2017.
- 5 National Highway Traffic Safety Administration inertia database metric. 1999 Verkkodokumentti.
<https://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/VRTC/ca/nhtsa_inertia_database_metric.pdf>. Luettu 1.3.2017.
- 6 Katz, Joseph. 1995. New Directions in Race Car Aerodynamics. Cambridge, MA: Bentley 1995.
- 7 Clio Cup User Manual. 2014. Verkkodokumentti. Renault Sport.
<http://motorsport.renault.se/wp-content/uploads/2015/02/A_User_Guide_2014_UK1.pdf>. Luettu 3.2.2017
- 8 Laine, Iiro. 2013. Säädetävän kallistuksenvakaajan käyttöönotto Electric RaceAbout -sähköurheiluautoon. s.4.
- 9 Puhn, Fred. 1976. How to Make Your Car Handle. New York: H. P. Books.
- 10 Milliken William F., Milliken, Douglas L. 1995. Race Car vehicle Dynamics. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers SAE 1995.
- 11 Pacejka, Hans. 2012. Tire and Vehicle Dynamics 3rd edition. Oxford: Butterworth-Heinemann cop.

Jousitusparametrit

```
[BODY]
name=body mass=(0) inertia=(0,0,0) //hdv
Pos=(0,0,0) Ori=(0,0,0)

// Front spindles
[BODY]
Name=fl_spindle Mass=(23.5) Inertia=(0.0481,0.0455,0.0429) //laske lopulliset inertiat
Pos=(0.83,0.1024014,-0.938355) Ori=(0,0,0)

[BODY]
Name=fr_spindle Mass=(23.5) Inertia=(0.0481,0.0455,0.0429)
Pos=(-0.83,0.1024014,-0.938355) Ori=(0,0,0)

// Front wheels
[BODY]
Name=fl_wheel Mass=(27.425) Inertia=(1.01,0.589,0.589)
Pos=(0.775,0.1,-0.938355) Ori=(0,0,0)

[BODY]
Name=fr_wheel Mass=(27.425) Inertia=(1.01,0.589,0.589)
Pos=(-0.775,0.1,-0.938355) Ori=(0,0,0)

// Rear spindles
[BODY]
Name=rl_spindle Mass=(18) Inertia=(0.0481,0.0455,0.0429)
Pos=( 0.815,0.0,1.646645) Ori=(0,0,0)

[BODY]
Name=rr_spindle Mass=(18) Inertia=(0.0481,0.0455,0.0429)
Pos=(-0.815,0.0,1.646645) Ori=(0,0,0)

// Rear wheels
[BODY]
Name=rl_wheel Mass=(20) Inertia=(0.845,0.49,0.49)
Pos=( 0.76,0.0,1.646645) Ori=(0,0,0)

[BODY]
Name=rr_wheel Mass=(20) Inertia=(0.845,0.49,0.49)
Pos=(-0.76,0.0,1.646645) Ori=(0,0,0)

[BODY]
Name=fuel_tank Mass=(0.0) Inertia=(0.1,0.1,0.1) //hdv
Pos=(0,0,0) Ori=(0,0,0)

[BODY]
Name=driver_head Mass=(6.6) Inertia=(0.047,0.036,0.039)
Pos=(0,0,0) Ori=(0,0,0)

////////// Constraints //////////

[JOINT&HINGE]
Name=fl_hinge Posbody=fl_wheel Negbody=fl_spindle Pos=fl_wheel Axis=(-1,0,0)

[JOINT&HINGE]
Name=fr_hinge Posbody=fr_wheel Negbody=fr_spindle Pos=fr_wheel Axis=( 1,0,0)

[JOINT&HINGE]
Name=rl_hinge Posbody=rl_wheel Negbody=rl_spindle Pos=rl_wheel Axis=(-1,0,0)

[JOINT&HINGE]
Name=rr_hinge Posbody=rr_wheel Negbody=rr_spindle Pos=rr_wheel Axis=( 1,0,0)

//front

[[BAR]
```

Name=fl_fore_lower Posbody=body Negbody=fl_spindle Pos=(0.2780207,0.0222219,-1.0165349) neg=(0.6545037,-0.0486069,-0.9437323)

[BAR]

Name=fl_rear_lower Posbody=body Negbody=fl_spindle Pos=(0.3423444,0.0259655,-0.783355) neg=(0.6545037,-0.0486069,-0.9437323)

[BAR] // fore upper arm (used in steering lock calculation)

Name=fl_fore_upper Posbody=body Negbody=fl_spindle Pos=(0.3070067,0.215639,-1.0694244) neg=(0.6725739,0.1556568,-0.9190793)

[BAR]

Name=fl_rear_upper Posbody=body Negbody=fl_spindle Pos=(0.2624253,0.2342821,-0.7632548) neg=(0.6725739,0.1556568,-0.9190793)

[BAR]

Name=fl_steering Posbody=body Negbody=fl_spindle Pos=(0.3451822,0.0373569,-0.743355) neg=(0.6604821,-0.029037,-0.7597461)

[BAR]

Name=fr_fore_lower Posbody=body Negbody=fr_spindle Pos=(-0.2780207,0.0222219,-1.0165349) neg=(-0.6545037,-0.0486069,-0.9437323)

[BAR]

Name=fr_rear_lower Posbody=body Negbody=fr_spindle Pos=(-0.3423444,0.0259655,-0.783355) neg=(-0.6545037,-0.0486069,-0.9437323)

[BAR] // fore upper arm (used in steering lock calculation)

Name=fr_fore_upper Posbody=body Negbody=fr_spindle Pos=(-0.3070067,0.215639,-1.0694244) neg=(-0.6725739,0.1556568,-0.9190793)

[BAR]

Name=fr_rear_upper Posbody=body Negbody=fr_spindle Pos=(-0.2624253,0.2342821,-0.7632548) neg=(-0.6725739,0.1556568,-0.9190793)

[BAR]

Name=fr_steering Posbody=body Negbody=fr_spindle Pos=(-0.3451822,0.0373569,-0.743355) neg=(-0.6604821,-0.029037,-0.7597461)

//rear

[BAR]

Name=rl_fore_lower Posbody=body Negbody=rl_spindle Pos=(0.17,-0.0026269,1.437645) neg=(0.6724842,-0.1037973,1.63763)

[BAR]

Name=rl_rear_lower Posbody=body Negbody=rl_spindle Pos=(0.17,-0.0036036,1.837645) neg=(0.6724842,-0.1037973,1.63763)

[BAR]

Name=rl_fore_upper Posbody=body Negbody=rl_spindle Pos=(0.2839221,0.2096556,1.437645) neg=(0.7012333,0.1733491,1.6376321)

[BAR]

Name=rl_rear_upper Posbody=body Negbody=rl_spindle Pos=(0.2839221,0.2180889,1.837645) neg=(0.7012333,0.1733491,1.6376321)

[BAR]

Name=rl_toelink Posbody=body Negbody=rl_spindle Pos=(0.1827222,-0.00961,1.837645) neg=(0.6739045,-0.10685,1.7876338)

[BAR]

Name=rr_fore_lower Posbody=body Negbody=rr_spindle Pos=(-0.17,-0.0026269,1.437645) neg=(-0.6724842,-0.1037973,1.63763)

[BAR]

Name=rr_rear_lower Posbody=body Negbody=rr_spindle Pos=(-0.17,-0.0036036,1.837645) neg=(-0.6724842,-0.1037973,1.63763)

[BAR]

Name=rr_fore_upper Posbody=body Negbody=rr_spindle Pos=(-0.2839221,0.2096556,1.437645) neg=(-0.7012333,0.1733491,1.6376321)

[BAR]

Name=rr_rear_upper Posbody=body Negbody=rr_spindle Pos=(-0.2839221,0.2180889,1.837645) neg=(-0.7012333,0.1733491,1.6376321)

[BAR]

Name=rr_toelink Posbody=body Negbody=rr_spindle Pos=(-0.1827222,-0.00961,1.837645) neg=(-0.6739045,-0.10685,1.7876338)

HDV-tiedosto

```

///CLIO RX 0.14///
//
//
[GENERAL]
Rules=0
GarageDisplayFlags=7
FeelerFlags=0
Mass=1200.0 //minimipaino kuskin kanssa 1200kg
Inertia=(1786.3, 1555.70,468.1) //tarkista
FuelTankPos=(0.00, 0.20, -0.20) //pa-tankki 42l, E-Chassis tarkista sijainti
FuelTankMotion=(560.0,0.7)
Symmetric=1
DamageFile=ClioRX_damage.ini // file to find physical and graphical damage info
CGHeight=0.36
CGRightRange=(0.500, 0.002, 1)
CGRightSetting=0
CGRearRange=(0.37, 0.000, 0)
CGRearSetting=0
GraphicalOffset=(0.0, -0.0, -0.0)
Undertray00=(0.73, 0.0080, -2.030) // offset from center of car, and between axles //
LF (Left front corner of splitter) (forward is negative, right is negative)
Undertray01=(-0.73, 0.0080, -2.030) // offset from center of car, and between axles //
RF (Right front corner of splitter)
Undertray02=(0.39, 0.0080, -2.070) // offset from center of car, and between axles //
Left center front nose
Undertray03=(-0.39, 0.0080, -2.070) // offset from center of car, and between axles //
Right center front nose
Undertray04=(0.80, 0.0085, -1.070) // offset from center of car, and between axles //
Floor LF corner
Undertray05=(-0.80, 0.0085, -1.070) // offset from center of car, and between axles //
Floor RF corner
Undertray06=(0.80, 0.0085, 0.850) // offset from center of car, and between axles // FLoor LR
corner
Undertray07=(-0.80, 0.0085, 0.850) // offset from center of car, and between axles //
Floor RR corner
Undertray08=(0.35, 0.0085, 2.110) // offset from center of car, and between axles // Left
Centre Rear
Undertray09=(-0.35, 0.0085, 2.110) // offset from center of car, and between axles // Right
Centre Rear
Undertray10=(0.74, 0.0085, 2.020) // offset from center of car, and between axles // LR
Corner
Undertray11=(-0.74, 0.0085, 2.020) // offset from center of car, and between axles // RR
Corner
UndertrayParams=(250000.0,12500.0, 2.0) // undertray spring rate, damper rate, and coefficient of friction
TireBrand=ClioRX_Tires.tbc
TireCompoundSetting=0
TireCompoundSetting=0
FuelRange=(1.0, 1.0, 42)
FuelSetting=35
NumPitstopsRange=(0, 1, 4)
NumPitstopsSetting=0
Pitstop1Range=(1.0, 1.0, 45)
Pitstop1Setting=45
Pitstop2Range=(1.0, 1.0, 45)
Pitstop2Setting=45
Pitstop3Range=(1.0, 1.0, 45)
Pitstop3Setting=45
AIminPassesPerTick=2 // minimum passes per tick (can use more accurate spring/damper/torque values,
but takes more CPU)
AIRotationThreshold=0.12 // rotation threshold (rads/sec) to temporarily increment passes per tick
AIEvenSuspension=0.0 // averages out spring and damper rates to improve stability (0.0 - 1.0)
AISpringRate=0.9 // spring rate adjustment for AI physics (improves stability)
AIDamperSlow=0.4 // contribution of average slow damper into simple AI damper
AIDamperFast=1.2 // contribution of average fast damper into simple AI damper

```

```

AIDownforceZArm=0.150           // hard-coded center-of-pressure offset from vehicle CG
AIDownforceBias=0.0             // bias between setup and hard-coded value (0.0-1.0)
AITorqueStab=(1.50, 1.50, 1.50) // torque adjustment to keep AI stable
FlatspotHeadShake=0.02
FlatspotForceFeedback=0.0001
FlatspotMaximumRPS=50

[FRONTWING]
FWRange=(0.0, 0.0, 0)           // front wing range
FWSetting=0                     // front wing setting
FWMaxHeight=(0.10)             // maximum height to take account of for downforce
FWDragParams=(0.020, 0.0, 0.0001) // base drag and 1st and 2nd order with setting
FWLiftParams=(-0.202626, -0.0000, 0.00001) // base lift and 1st and 2nd order with setting //was 2100
FWLiftHeight=(0.335)           // effect of current height on lift coefficient
FWLiftSideways=(0.5)           // dropoff in downforce with yaw (0.0 = none, 1.0 = max)
FWLeft=(-0.005, 0.0, 0.0)      // aero forces from moving left
FWRight=(0.005, 0.0, 0.0)      // aero forces from moving right
FWUp=(0.0, -0.02, -0.001)      // aero forces from moving up
FWDown=(0.0, 0.02, 0.001)      // aero forces from moving down
FWAft=(0.0, 0.02, -0.02)       // aero forces from moving rearwards
FWFore=(0.0, 0.0, 0.0)         // aero forces from moving forwards (recomputed from settings)
FWRot=(0.05, 0.025, 0.075)     // aero torque from rotating
FWCenter=(0.00, 0.00, -1.45)   // center of front wing forces (offset from center of front axle in ref plane)

[REARWING]
RWRange=(0.0, 1.0, 5)         // rear wing range
RWSetting=3                   // rear wing setting
RWDragParams=(0.030, 0.005, 0.0001) // base drag and 1st and 2nd order with setting
RWLiftParams=(-0.135084, -0.0250, 0.00001) // base lift and 1st and 2nd order with setting was 2050
RWLiftSideways=(0.5)           // dropoff in downforce with yaw (0.0 = none, 1.0 = max)
RWLeft=(-0.005, 0.0, 0.0)      // aero forces from moving left
RWRight=(0.005, 0.0, 0.0)      // aero forces from moving right
RWUp=(0.0, -0.02, -0.001)      // aero forces from moving up
RWDown=(0.0, 0.02, 0.001)      // aero forces from moving down
RWAft=(0.0, 0.02, -0.02)       // aero forces from moving rearwards
RWFore=(0.0, 0.0, 0.0)         // aero forces from moving forwards (recomputed from settings)
RWRot=(0.01, 0.02, 0.02)       // aero torque from rotating
RWCenter=(0.00, 0.60, 1.23)    // center of rear wing forces (offset from center of rear axle at ref plane)

[BODYAERO]
BodyDragBase=(0.869)
BodyDragHeightAvg=(0.005)
BodyDragHeightDiff=(0.050)
BodyMaxHeight=(0.20)
BodyLeft=(-0.2, 0.0, 0.0)       // aero forces from moving left
BodyRight=(0.2, 0.0, 0.0)       // aero forces from moving right
BodyUp=(0.0, -0.5, 0.0)         // aero forces from moving up
BodyDown=(0.0, 0.5, 0.0)        // aero forces from moving down
BodyAft=(0.0, 0.05, -0.3)       // aero forces from moving rearwards
BodyFore=(0.0, -0.1000, 0.400)
BodyRot=(0.7, 0.5, 0.4)         // aero torque from rotating
BodyCenter=(-0.015, 0.10, -0.0644) // Decrease third number for more oversteering balance.( when
balancing mechanical grip )
RadiatorRange=(4.0, 0.0, 0)     // radiator range
RadiatorSetting=0               // radiator setting
RadiatorDrag=(0.0)              // effect of radiator setting on drag
RadiatorLift=(0.0)              // effect of radiator setting on lift
BrakeDuctRange=(1.0,0.0,0)
BrakeDuctSetting=0
BrakeDuctDrag=(0.00)
BrakeDuctLift=(0.00)

[DIFFUSER]
DiffuserBase=(-0.155, -2.33, 43.0) // base lift and 1st/2nd order with rear ride height
DiffuserFrontHeight=(0.450)        // 1st order with front ride height
DiffuserSideways=(0.5)             // dropoff with yaw (0.0 = none, 1.0 = max)
DiffuserCenter=(0.0, 0.00, -1.50)  // Decrease third number to move diffuser further to the rear giving more aero rear
bias.

[SUSPENSION]
PhysicalModelFile=Clio13_Susp_korkeushusa.pm
ApplySlowToFastDampers=0          // whether to apply slow damper settings to fast damper settings
AdjustSuspRates=1                 // adjust suspension rates due to motion ratio

```

```

AlignWheels=1           // correct for minor graphical offsets
FrontWheelTrack=0       // if non-zero, forces the front wheels to be specified track width
RearWheelTrack=0        // if non-zero, forces the rear wheels to be specified track width
1.559
LeftWheelBase=0.0       // if non-zero, forces the left side to use specified wheelbase
RightWheelBase=0.0      // if non-zero, forces the right side to use specified wheelbase
SpringBasedAntiSway=1
FrontAntiSwayBase=0.0
FrontAntiSwayRange=(10000.0, 5000.0, 21)
FrontAntiSwaySetting=1
FrontAntiSwayRate=(0.0, 0.0)
RearAntiSwayBase=0.0
RearAntiSwayRange=(80000.0, 5000.0, 41) //torsion beam rear axle!
RearAntiSwaySetting=30
RearAntiSwayRate=(0.0, 0.0)
FrontToeInRange=(-1.0, 0.05, 41)
FrontToeInSetting=10 //def toe 0degree
RearToeInRange=(-1.0, 0.05, 41)
RearToeInSetting=24 //2mm toe in
LeftCasterRange=(-0.0, 0.25, 71) // front-left caster 4.5deg
LeftCasterSetting=18
RightCasterRange=(-0.0, 0.25, 71) // front-right caster
RightCasterSetting=18

[CONTROLS]
OnboardBrakeBias=1      // whether brake bias is allowed onboard
SteeringFFBMult=0
SteerLockUserSetting=4
SteeringRotation=(540, 10.0, 10)
SteeringRotationSetting=0
UpshiftAlgorithm=(0.99,0.0) // percentage of the rev limit to upshift at. If the 2nd value is non-zero, then we will use it
as the exact RPM to upshift at.
DownshiftAlgorithm=(0.95,0.95,0.6) // percentage of "optimum" downshift point in high gears, percentage of "optimum"
downshift point in low gears, oval adjustment.
SteerLockRange=(10.0, 0.5, 49)
SteerLockSetting=25
PneumaticTrailGripFractPower=0.3
RearBrakeRange=(0.200, 0.005, 121)
RearBrakeSetting=50
BrakePressureRange=(0.50, 0.05, 11)
BrakePressureSetting=10
HandbrakePressRange=(0.00, 0.05, 21) //
HandbrakePressSetting=10
AutoUpshiftGripThresh=0.40 // auto upshift waits until all driven wheels have this much grip (reasonable range:
0.4-0.9)
AutoDownshiftGripThresh=0.40 // auto downshift waits until all driven wheels have this much grip (reasonable
range: 0.4-0.9)
TractionControlGrip=(1.00, 0.20) // average driven wheel grip multiplied by 1st number, then added to 2nd
TractionControlLevel=(0.20, 0.35) // effect of grip on throttle for low TC and high TC
ABS4Wheel=1            // 0 = old-style single brake pulse, 1 = more effective 4-wheel ABS
ABSGrip=(1.00, 0.20)   // grip multiplied by 1st number and added to 2nd
ABSLevel=(0.30, 0.90) // effect of grip on brakes for low ABS and high ABS

[ENGINE]
RevLimitAvailable=1
SpeedLimiter=1         // Whether a pitlane speed limiter is available
Normal=ClioRX_Engine.ini
RestrictorPlate=ClioRX_Engine.ini

[DRIVELINE]
ClutchEngageRate=0.9   //Auto clutch gradual engagement rate from neutral to 1st gear.
ClutchInertia=0.0148
ClutchTorque=900.0
ClutchWear=0.0
ClutchFriction=17.225
BaulkTorque=500.0
SemiAutomatic=1       // whether throttle and clutch are operated automatically
AllowManualOverride=1 // whether to allow manual shift overrides when using auto shifting
UpshiftDelay=0.07      // delay in selecting higher gear (low for semi-automatic, higher for manual)
UpshiftClutchTime=0.09 // time to ease auto-clutch in AFTER upshift (0.0 for F1 cars)
DownshiftDelay=0.07    // delay in selecting lower gear (low for semi-automatic, higher for manual)
DownshiftClutchTime=0.09 // time to ease auto-clutch in AFTER downshift (used to be SemiAutoClutchTime, note
that the shift will complete significantly before the clutch is fully engaged)

```

```

DownshiftBlipThrottle=0.83      // amount of throttle used to blip if controlled by game (instead of player)
WheelDrive=Front
GearFile=ClioRX_Gears.ini
DownshiftProtection=1.25
FinalDriveSetting=1
ReverseSetting=0
ForwardGears=6
Gear1Setting=1
Gear2Setting=2
Gear3Setting=3
Gear4Setting=4
Gear5Setting=5
Gear6Setting=6
DiffPumpTorque=0.0
DiffPumpRange=(0.0,0.00,0)      // differential acting on all driven wheels
DiffPumpSetting=0
DiffPowerRange=(0.866,0.0,0)    // (Cos 30deg) fraction of power-side input torque transferred through diff
DiffPowerSetting=0              // (not implemented for four-wheel drive)
DiffCoastRange=(0.173,0.00,00)  // (Cos 80deg) fraction of coast-side input torque transferred through diff
DiffCoastSetting=0              // (not implemented for four-wheel drive)
DiffPreloadRange=(50.0, 10.0, 12) // preload torque, Adjustable preload springs (50-170Nm)
DiffPreloadSetting=0            // (not implemented for four-wheel drive)

[FRONTLEFT]
BumpTravel=-0.090                //Jousto edessä 186mm * K-ratio 1.03 sisäänjousto n.60mm
ReboundTravel=-0.290
BumpStopSpring=150000.0          // initial spring rate of bumpstop
BumpStopRisingSpring=2.00e7
BumpStopDamper=2000.0
BumpStopRisingDamper=7.00e5
BumpStage2=0.090
ReboundStage2=-0.090
FrictionTorque=1.50              // Newton-meters of friction between spindle and wheel
SpinInertia=1.727                // inertia in pitch direction including any axle
CGOffsetX=0.000
PushrodSpindle=(-0.120, -0.000, 0.000)// spring/damper connection to spindle or axle (relative to wheel center)
PushrodBody=(-0.150, 0.300, 0.030) // spring/damper connection to body (relative to wheel center)
CamberRange=(-4.0, 0.1, 81)
CamberSetting=25
PressureRange=(160.0, 1.0, 31)
PressureSetting=10
PackerRange=(0.000, 0.0, 0)
PackerSetting=0
SpringRange=(25000.0, 5000.0, 15)
SpringSetting=4
RideHeightRange=(0.10, 0.01, 10)
RideHeightSetting=4
SlowBumpRange=(2000.0, 500.0, 11)
SlowBumpSetting=0
FastBumpRange=(2000.0, 500.0, 11)
FastBumpSetting=0
SlowReboundRange=(3500.0, 500.0, 11)
SlowReboundSetting=1
FastReboundRange=(3500.0, 500.0, 11)
FastReboundSetting=1
BrakeDiscRange=(0.035, 0.000, 0) // disc thickness
BrakeDiscSetting=0
BrakePadRange=(0, 1, 5)          // pad type (not implemented)
BrakePadSetting=2
BrakeDisclnertia=1.25            // inertia per meter of thickness
BrakeOptimumTemp=450.0           // optimum brake temperature in Celsius
BrakeFadeRange=450.0             // temperature outside of optimum that brake grip drops to half (too hot or too cold)
BrakeWearRate=1.215e-011         // meters of wear per second at optimum temperature
BrakeFailure=(1.33e-002,7.20e-004) // average and variation in disc thickness at failure
BrakeTorque=3400.0               // maximum brake torque at zero wear and optimum temp
BrakeHeating=0.00065             // heat added linearly with brake torque
BrakeCooling=(1.910e-002,0.667e-004) // minimum brake cooling rate (static and per unit velocity)
BrakeDuctCooling=2.000e-004      // brake cooling rate per brake duct setting
BrakeGlow=(400,800)

[FRONTRIGHT]
BumpTravel=-0.090
ReboundTravel=-0.290

```

```

BumpStopSpring=150000.0      // initial spring rate of bumpstop
BumpStopRisingSpring=2.00e7
BumpStopDamper=2000.0
BumpStopRisingDamper=7.00e5
BumpStage2=0.090
ReboundStage2=-0.090
FrictionTorque=1.50          // Newton-meters of friction between spindle and wheel
SpinInertia=1.727            // inertia in pitch direction including any axle
CGOffsetX=0.000
PushrodSpindle=(0.120, -0.000, 0.000)// spring/damper connection to spindle or axle (relative to wheel center)
PushrodBody=(0.150, 0.300, 0.030) // spring/damper connection to body (relative to wheel center)
CamberRange=(-4.0, 0.1, 81)
CamberSetting=25
PressureRange=(160.0, 1.0, 31)
PressureSetting=10
PackerRange=(0.000, 0.0, 0)
PackerSetting=0
SpringRange=(25000.0, 5000.0, 15)
SpringSetting=4
RideHeightRange=(0.10, 0.01, 10)
RideHeightSetting=4
SlowBumpRange=(2000.0, 500.0, 11)
SlowBumpSetting=0
FastBumpRange=(2000.0, 500.0, 11)
FastBumpSetting=0
SlowReboundRange=(3500.0, 500.0, 11)
SlowReboundSetting=1
FastReboundRange=(3500.0, 500.0, 11)
FastReboundSetting=1
BrakeDiscRange=(0.035, 0.000, 0) // disc thickness
BrakeDiscSetting=0
BrakePadRange=(0, 1, 5)         // pad type (not implemented)
BrakePadSetting=2
BrakeDiscInertia=1.25          // inertia per meter of thickness
BrakeOptimumTemp=450.0         // optimum brake temperature in Celsius
BrakeFadeRange=450.0          // temperature outside of optimum that brake grip drops to half (too hot or too cold)
BrakeWearRate=1.215e-011       // meters of wear per second at optimum temperature
BrakeFailure=(1.33e-002,7.20e-004) // average and variation in disc thickness at failure
BrakeTorque=3400.0             // maximum brake torque at zero wear and optimum temp
BrakeHeating=0.00065           // heat added linearly with brake torque
BrakeCooling=(1.910e-002,0.667e-004) // minimum brake cooling rate (static and per unit velocity)
BrakeDuctCooling=2.000e-004    // brake cooling rate per brake duct setting
BrakeGlow=(400,800)

```

[REARLEFT]

```

BumpTravel=-0.120             //jousto takana 195 k ratio 1.04
ReboundTravel=-0.320
BumpStopSpring=150000.0      // initial spring rate of bumpstop
BumpStopRisingSpring=2.00e7
BumpStopDamper=2000.0
BumpStopRisingDamper=7.00e5
BumpStage2=0.090
ReboundStage2=-0.090
FrictionTorque=2.50          // Newton-meters of friction between spindle and wheel
SpinInertia=1.350            // inertia in pitch direction including any axle
CGOffsetX=0.000
PushrodSpindle=(-0.100, -0.000, 0.000)// spring/damper connection to spindle or axle (relative to wheel center)
PushrodBody=(-0.150, 0.300, 0.000) // spring/damper connection to body (relative to wheel center)
CamberRange=(-4.0, 0.1, 81)
CamberSetting=25             //1.5deg
PressureRange=(160.0, 1.0, 31)
PressureSetting=10
PackerRange=(0.000, 0.0, 0)
PackerSetting=0
SpringRange=(25000, 5000.0, 15)
SpringSetting=2
RideHeightRange=(0.12, 0.01, 10)
RideHeightSetting=5
SlowBumpRange=(2000.0, 500.0, 11)
SlowBumpSetting=0
FastBumpRange=(2000.0, 500.0, 11)
FastBumpSetting=0
SlowReboundRange=(3500.0, 500.0, 11)

```

```

SlowReboundSetting=1
FastReboundRange=(3500.0, 500.0, 11)
FastReboundSetting=1
BrakeDiscRange=(0.032, 0.000, 0) // disc thickness
BrakeDiscSetting=0
BrakePadRange=(0, 1, 5) // pad type (not implemented)
BrakePadSetting=2
BrakeDiscInertia=0.001 // inertia per meter of thickness
BrakeOptimumTemp=450.0 // optimum brake temperature in Celsius (peak brake grip)
BrakeFadeRange=450.0 // temperature outside of optimum that brake grip drops to half (too hot or too cold)
BrakeWearRate=1.215e-011 // meters of wear per second at optimum temperature
BrakeFailure=(1.33e-002,7.20e-004) // average and variation in disc thickness at failure
BrakeTorque=2000.0 // maximum brake torque at zero wear and optimum temp
BrakeHeating=0.00065 // heat added linearly with brake torque
BrakeCooling=(1.435e-002,0.268e-004) // minimum brake cooling rate (static and per unit velocity)
BrakeDuctCooling=1.200e-004 // brake cooling rate per brake duct setting
BrakeGlow=(400,800)

[REARRIGHT]
BumpTravel=-0.120
ReboundTravel=-0.320
BumpStopSpring=150000.0 // initial spring rate of bumpstop
BumpStopRisingSpring=2.00e7
BumpStopDamper=2000.0
BumpStopRisingDamper=7.00e5
BumpStage2=0.090
ReboundStage2=-0.090
FrictionTorque=2.50 // Newton-meters of friction between spindle and wheel
SpinInertia=1.350 // inertia in pitch direction including any axle
CGOffsetX=-0.000
PushrodSpindle=(0.100, -0.000, 0.000) // spring/damper connection to spindle or axle (relative to wheel center)
PushrodBody=(0.150, 0.300, 0.000) // spring/damper connection to body (relative to wheel center)
CamberRange=(-4.0, 0.1, 81)
CamberSetting=25
PressureRange=(160.0, 1.0, 31)
PressureSetting=10
PackerRange=(0.000, 0.0, 0)
PackerSetting=0
SpringRange=(25000, 5000.0, 15)
SpringSetting=2
RideHeightRange=(0.12, 0.01, 10)
RideHeightSetting=5
SlowBumpRange=(2000.0, 500.0, 11)
SlowBumpSetting=0
FastBumpRange=(2000.0, 500.0, 11)
FastBumpSetting=0
SlowReboundRange=(3500.0, 500.0, 11)
SlowReboundSetting=1
FastReboundRange=(3500.0, 500.0, 11)
FastReboundSetting=1
BrakeDiscRange=(0.032, 0.000, 0) // disc thickness
BrakeDiscSetting=0
BrakePadRange=(0, 1, 5) // pad type (not implemented)
BrakePadSetting=2
BrakeDiscInertia=0.001 // inertia per meter of thickness
BrakeOptimumTemp=450.0 // optimum brake temperature in Celsius (peak brake grip)
BrakeFadeRange=450.0 // temperature outside of optimum that brake grip drops to half (too hot or too cold)
BrakeWearRate=1.215e-011 // meters of wear per second at optimum temperature
BrakeFailure=(1.33e-002,7.20e-004) // average and variation in disc thickness at failure
BrakeTorque=2000.0 // maximum brake torque at zero wear and optimum temp
BrakeHeating=0.00065 // heat added linearly with brake torque
BrakeCooling=(1.435e-002,0.268e-004) // minimum brake cooling rate (static and per unit velocity)
BrakeDuctCooling=1.200e-004 // brake cooling rate per brake duct setting
BrakeGlow=(400,800)

```

Kyselylomake

Auton käyttäytyminen oikeaan verrattuna					
Ohjaustuntuma	Tod. Huono	Huono		Hyvä	Tod. Hyvä
Kaarteen sisääntulossa					
kaarteessa					
Kaarteen ulostulossa					
Yliohjaus	Liian vähän		vastaava		Liian paljon
Kaarteen sisääntulossa					
kaarteessa					
Kaarteen ulostulossa					
Aliohjaus	Liian vähän		vastaava		Liian paljon
Kaarteen sisääntulossa					
kaarteessa					
Kaarteen ulostulossa					
Rengaspidon määrä	Liian vähän		vastaava		Liian paljon
Asvaltti					
Sora					
kiihdytys					
jarrutus					
kaarreaajo					
Pidon menetys ajon aikana	Liian paljon		vastaava		Liian vähän
Eturenkaat					
Takarenkaat					
Ajamisen helppous	Liian helppo		vastaava		Liian vaikea
Yliohjauksen korjaaminen					
Aliohjauksen korjaaminen					
Moottori	Liian vähän		vastaava		Liian paljon
teho alakierroksilla					
teho keskialueella					
teho yläkierroksilla					
Jousitus / painopiste	liian vähän		vastaava		liikaa
kallistelu kaarteissa					
jousituksen jäykkyys					
Mitä olennaisia ajo-ominaisuuksia mallista puuttuu?					